

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

VALIDACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS SATELITALES A PARTIR DE UN ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMPARATIVO CON DATOS GRAVIMÉTRICOS DE ADQUISICIÓN TERRESTRE.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Nuris Orihuela

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Ing. Garzón C., Yaneth
para optar al Título
de Magister en Geofísica

Caracas, Diciembre de 2010

Garzón C., Yaneth

**VALIDACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS SATELITALES A PARTIR
DE UN ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMPARATIVO CON DATOS
GRAVIMÉTRICOS DE ADQUISICIÓN TERRESTRE.**

**Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2010, 115 p.**

Palabras Claves: Geoestadística, análisis comparativo, datos satelitales, estadística,
Cordillera de la Costa, Faja Petrolífera, Red gravimétrica de primer orden.

RESUMEN

Se realizó un análisis geoestadístico comparativo entre datos de Anomalía de Bouguer (AB) calculados a partir de modelos combinados con datos satelitales y anomalías terrestres en la Faja Petrolífera del Orinoco y Cordillera de la Costa, así como la comparación numérica entre datos de gravedad del modelo combinado con datos satelitales y datos de gravedad absoluta terrestres pertenecientes a la Red Gravimétrica Nacional (RGN) de primer orden, a través del uso de herramientas estadísticas básicas, la implementación de modelos lineales y métodos de geoestadística.

Para todos los casos se observan similitudes entre los datos satelitales y terrestres en términos numéricos y estadísticos. En general, los datos presentan entre ellos una dependencia lineal positiva, un alto coeficiente de correlación y una tendencia análoga de aumento de la gravedad con la latitud, representada por los modelos lineales planteados.

Al establecer un intervalo de confianza del 95% alrededor de los datos terrestres, se determinó que en un 90% de los casos los datos satelitales cumplen con los límites de incertidumbre permitidos. Estos resultados aunados a las correspondencias numéricas

y espaciales observadas permitieron validar los datos de satélite como equivalentes a los terrestres.

En la Faja Petrolífera las diferencias de cota mayores a 20 metros, la distribución espacial de los datos y el instrumental empleado son las fuentes de error responsables de las diferencias de AB encontradas. En Cordillera de la Costa, las diferencias entre AB satelital y terrestre son de origen aleatorio. En el análisis correspondiente a la Red Gravimétrica de primer orden, las diferencias de gravedad son en promedio de 11 miligales, dentro de un intervalo que abarca desde los -13 a 35 miligales de diferencia. No presentan tendencia espacial alguna, por lo que estadísticamente no fue posible determinar con claridad la componente que genera estas diferencias.

Adicionalmente, se demostró de forma comparativa que los datos satelitales al tener una distribución homogénea de las mediciones a lo largo de las zonas en estudio permiten una mejora sustancial en la representación de los rasgos geológicos observados en los mapas de Anomalía de Bouguer.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	II
TABLA DE CONTENIDO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XIV
CAPÍTULO I.....	16
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	18
1.3 APORTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2.1 ESTADÍSTICA BÁSICA.....	21
2.1.1 Estadística descriptiva.....	21
2.2 CORRELACIÓN LINEAL Y ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	23
2.2.1 Método de mínimos cuadrados.....	24
2.2.2 Coeficiente de correlación de Pearson.....	24
2.2.3 Prueba de utilidad del modelo lineal.....	25

2.3 ESTADÍSTICA ESPACIAL: GEOESTADÍSTICA.....	26
2.3.1 Variograma	26
2.3.2 Variograma experimental	27
2.3.3 Variogramas teóricos.....	30
2.3.4 Kriging.....	31
2.3.5 Mínima curvatura	32
2.4 PROPIEDADES ESPACIALES DE LOS DATOS.....	33
CAPÍTULO III	36
3.1 FUENTE DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS	36
3.1.1 Faja Petrolífera del Orinoco	36
3.1.2. Cordillera de la Costa	37
3.1.3. Red gravimétrica nacional.....	38
3.2 MUESTREO DE LOS DATOS	40
3.3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	42
CAPÍTULO IV	48
4.1 ZONA TIPO 1: FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO	48
4.1.1. Resolución de los datos	48
4.1.2. Estadísticos básicos y modelos lineales.....	48

4.1.3 Geoestadística: Kriging	58
4.1.3.1 Variografía.....	58
4.1.3.2 Estimación por Kriging	61
4.1.3.3 Intervalos de confianza	64
4.2. ZONA TIPO 2: CORDILLERA DE LA COSTA	66
4.2.1. Resolución de los datos	66
4.2.2. Estadísticos básicos y modelos lineales.....	67
4.2.3 Geoestadística: Kriging	77
4.2.3.1 Variografía.....	77
4.2.3.2 Estimación por Kriging	80
4.2.3.3 Intervalos de confianza.....	84
4.3. RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL	85
4.3.1. Resolución de los datos	85
4.3.2 Estadísticos básicos y modelos lineales.....	85
4.3.3 Geoestadística: Kriging	98
4.3.3.1 Variografía comparativa	99
CAPÍTULO V.....	103
5.1. FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO	103

5.2. CORDILLERA DE LA COSTA.....	104
5.3. RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL.....	105
5.4 DATOS SATELITALES VS DATOS TERRESTRES	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	110
APÉNDICES.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación de la zona en estudio..	19
Figura 2.1 Espaciamiento h entre datos en una dimensión.	28
Figura 2.2. Variograma experimental de datos en dos dimensiones.	28
Figura 2.3. Distribución regular de datos en una red y distribución irregular de datos	29
Modificado de Ambrosio (2007).....	29
Figura 2.4. Tolerancia con la distancia (Δh).	29
Figura 2.5. Tolerancia con el ángulo ($\Delta\theta$).	30
Figura 2.6. Parámetros del variograma y modelos autorizados.	31
Figura 2.7. Superficies de tendencia. a) de primer orden. b) de segundo orden.	34
Figura 2.8. Variable estacionaria o sin tendencia.	35
Figura 3.1. Mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas.	36
Figura 3.2. Mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas terrestres (color verde) y satelitales (cuadros negros) pertenecientes a Cordillera de la Costa.	38
Figura 3.3. Mapa topográfico de Venezuela con estaciones de gravedad terrestre de primer orden (cuadros blancos).	39
Figura 3.4. Gráfico de distribución de cotas de estaciones por rangos de elevación..	40
Figura 3.5. Esquema del procedimiento para muestrear los datos de satélite y tierra.	41

Figura 3.6. Esquema del procedimiento para muestrear los datos de satélite y tierra.	42
Figura 3.7. Metodología estadística empleada durante la comparación numérica y espacial de los datos satelitales y terrestres.	43
Figura 3.8. Límites de incertidumbre.	44
Figura 4.1. a) Histograma de frecuencia para AB satelital. b) Histograma de frecuencia para AB terrestre. c) Gráfico QQ para AB satelital. d) Gráfico QQ para AB terrestre.	49
Figura 4.2. Gráfico de dispersión AB satelital contra AB terrestre.	50
Figura 4.3. a) Diagrama de caja y bigote para AB terrestre. b) Diagrama de caja y bigotes para AB satelital.	51
Figura 4.4. Mapa de percentiles de AB satelital y terrestre.	52
Figura 4.5. a) Histograma de frecuencia para diferencias de AB. b) Histograma de frecuencia para diferencias de cota. c) Gráfico QQ para diferencias de AB. d) Gráfico QQ para diferencias de cota.	54
Figura 4.6. Mapa topográfico de la zona en estudio. Los círculos amarillos son estaciones con diferencias de cota mayores a 50 metros.	56
Figura 4.7. a) Histograma de frecuencia para residuales de diferencias de cota. b) Histograma de frecuencia para residuales de diferencias de AB. c) Gráfico QQ para residuales de diferencias de cota. d) Gráfico QQ para residuales de diferencias de AB.	57
Figura 4.8. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital.	59

Figura 4.9. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital.	60
Figura 4.10. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging, a partir de las localizaciones satelitales.	61
Figura 4.11. Mapa de Varianza estimado a partir de Kriging para AB terrestre.	62
Figura 4.12. Mapa de AB satelital estimado a partir de Kriging.	63
Figura 4.13. Mapa de profundidad al tope de basamento estimada a partir de Mínima Curvatura.	63
Figura 4.14. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging.	64
Figura 4.15. Ubicación de los puntos con diferencias de cota mayores a 20 m (cuadros verdes) y datos fuera del intervalo de confianza (triángulos amarillos) sobre el mapa de Varianza para AB terrestre.	65
Figura 4.16. a) Histograma de frecuencia de AB terrestre. b) Histograma de frecuencia de AB satelital. c) Gráfico QQ para AB terrestre. d) Gráfico QQ para AB satelital. e) Diagramas de caja y bigote para AB terrestre. f) Diagramas de caja y bigote para AB satelital.	68
Figura 4.17. Gráfico de dispersión AB satelital contra AB terrestre.	69
Figura 4.18. a) Histograma de frecuencia de residuales del modelo lineal planteado para AB terrestre en función de la longitud y latitud. b) Histograma de frecuencia de residuales del modelo lineal planteado para AB satelital en función de la longitud y latitud.	70
Figura 4.19. Mapa topográfico de la Cordillera de la Costa. El recuadro verde encierra la zona en estudio.	71

Figura 4.20. Gráfico de dispersión cota satelital contra cota terrestre.....	72
Figura 4.21. a) Histogramas de frecuencia para diferencias de AB. b) Histogramas de frecuencia para diferencias de cotas. c) Gráfico QQ para diferencias de AB. d) Gráfico QQ para diferencias de cotas.....	74
Figura 4.22. Gráfico de dispersión diferencias de AB vs diferencias de cotas.....	75
Figura 4.23. Mapa topográfico de la Cordillera de la Costa y estaciones con diferencias de cota menores y mayores a 50 m (círculos rosados y triángulos verdes, respectivamente).....	77
Figura 4.24. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital.....	78
Figura 4.25. a) Variograma teórico ajustado para direcciones preferenciales de AB terrestre. b) Variograma teórico ajustado para direcciones preferenciales de AB satelital.....	79
Figura 4.25. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging. Nótese la tendencia regional marcada en sentido SO-NE.....	81
Figura 4.26. Mapa de Varianza estimado a partir de Kriging para AB terrestre.	82
Figura 4.27. Mapa de AB satelital estimado a partir de Mínima Curvatura.....	83
Figura 4.28. a) Histograma de frecuencia para gravedad observada satelital. b) Histograma de frecuencia para gravedad observada terrestre. c) Gráfico QQ para gravedad observada satelital. d) Gráfico QQ para gravedad observada terrestre.....	86
Figura 4.29. a) Diagrama de caja y bigote para gravedad observada satelital. b) Diagrama de caja y bigote para gravedad observada terrestre.	87

Figura 4.30. a) Histograma de frecuencia para diferencias de gravedad observada. b) Gráfico QQ para diferencias de gravedad observada.	88
Figura 4.31. Diagrama de caja y bigote para diferencias de gravedad observada.	88
Figura 4.32. Gráfico de distribución de cotas para valores fuera de rango.....	89
Figura 4.33. Nuevo gráfico de distribución de cotas de estaciones por rangos de elevación.....	90
Figura 4.34. a) Histograma de frecuencia para gravedad observada terrestre. b) Histograma de frecuencia para gravedad observada satelital. c) Histograma de frecuencia para diferencias de gravedad. d) Gráfico QQ para gravedad observada terrestre. e) Gráfico QQ para gravedad observada satelital. f) Gráfico QQ para diferencias de gravedad.	91
Figura 4.35. Mapas preliminares de gravedad observada terrestre (a) y satelital (b)..	92
Figura 4.36. Mapa de percentiles para valores absolutos de las diferencias de gravedad observada.	93
Figura 4.37. Gráfico de dispersión gravedad observada terrestre contra gravedad observada satelital.....	94
Figura 4.38. Superficies de tendencia asociadas a los modelos lineales planteados para gravedad observada terrestre (a) y satelital (b) contra latitud.....	95
Figura 4.39. Gráficos de dispersión gravedad observada terrestre y satelital contra latitud.....	96
Figura 4.40. Gráfico de dispersión elevación contra diferencias de gravedad (en valor absoluto).	97

Figura 4.41. Percentiles de diferencias de gravedad sobre el mapa topográfico de Venezuela.	98
Figura 4.42. a) Mapa de variograma para gravedad observada terrestre. b) Mapa de variograma para gravedad observada terrestre. l.	99
Figura 4.43. Variogramas teóricos ajustados sobre variogramas experimentales en la dirección de máxima y mínima continuidad de gravedad observada terrestre (a) y satelital (b).	100
Figura 4.44. Mapa de variograma para gravedad observada satelital con direcciones de máxima y mínima continuidad.....	101
Figura 4.45. Variograma teóricos ajustados sobre variograma experimentales para gravedad satelital.	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Descriptivos estadísticos. Tomado de Wampole (1999) y Ross (2004). ..	22
Tabla 2.2. Gráficos estadísticos básicos. Tomado de Dalgaard (2002).	23
Tabla 2.3. Gráficos espaciales básicos. Tomado de Dalgaard (2002) y Ambrosio (2007).	26
Tabla 4. Parámetros del variograma. Tomado de Ambrosio (2007).	30
Tabla3.1. Clasificación de las estaciones de gravedad absoluta por intervalos de elevación.	39
Tabla 4.1. Descriptivos básicos de las cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.	48
Tabla 4.2. Descriptivos básicos de las diferencias de cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.	53
Tabla 4.3. Resumen de los valores del modelo lineal 2 planteado para diferencias de cota.	55
Tabla 4.4. Resumen de los valores del modelo lineal 2 planteado para diferencias de AB.	55
Tabla 4.5. Descriptivos básicos de las cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.	67
Tabla 4.6. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB satelital y terrestre.....	69
Tabla 4.7. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB satelital....	70

Tabla 4.8. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB terrestre...	71
Tabla 4.9. Resumen de los valores del modelo lineal para cota satelital en función de la latitud.....	73
Tabla 4.10. Resumen de los valores del modelo lineal para cota terrestre en función de la latitud.....	73
Tabla 4.11. Descriptivos básicos de las diferencias de cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.	73
Tabla 4.12. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de cota	75
Tabla 4.13. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de AB.	76
Tabla 4.14. Descriptivos básicos de las datos de gravedad observada satelitales y terrestres.	85
Tabla 4.15. Descriptivos básicos de las diferencias gravedad observada.	87
Tabla 4.16. Descriptivos básicos de las datos de gravedad observada satelitales y terrestres.	91
Tabla 4.17. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada.	94
Tabla 4.18. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada terrestre	94
Tabla 4.19. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada satelital.....	95

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los satélites terrestres de órbita baja (LEO, siglas en inglés para Low Earth Orbit), orbitan a una altura que oscila entre 100 km a 1000 km sobre la superficie de la Tierra. En este grupo, operan alrededor de 380 satélites, de los cuales el 70% aproximadamente están destinados a la observación de la superficie de la Tierra en un espectro que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Por otro lado, del 30% restante, tan solo el 1% se emplean para mediciones de propiedades físicas, tales como magnetismo, electromagnetismo, gravedad, entre otras (Ma, D., 2006; Campbell, 2007).

Hoy en día, se puede decir que a partir de estas misiones satelitales, la comunidad científica está en capacidad de acceder al conocimiento de la física de la Tierra a escala global, siendo el mayor beneficio la gran capacidad de muestrear información en espacio y tiempo con precisión (Barlier y Lefebvre, 2001). Particularmente en el campo de la gravimetría, uno de los avances más significativos es la precisión en la medición altimétrica, tanto en mar como en tierra, lo cual mejora la estimación del campo gravitatorio global (McAdoo, 2006).

El modelo gravitacional actual de la Tierra, Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), es generado a partir de series de armónicos esféricos de grado y orden 2160, con algunos términos adicionales de grado y orden 2190; lo cual le confiere una precisión que alcanza los 9,3 kilómetros en el ecuador y además, ofrece un modelo de geoide de 15 cm RMS de precisión global (Pavlis et. al, 2008).

El modelo EGM2008 utiliza topografía de alta resolución e información gravitacional de los satélites gemelos GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

combinada con datos de gravedad de origen continental, aerotransportado y marino (Pavlis et. al, 2008).

Este avance en las tecnologías espaciales ha dado inicio a una nueva etapa en los estudios de gravedad terrestre. En Venezuela específicamente, una gran cantidad de investigaciones han estado apoyadas en el método gravimétrico, y han sido de vital importancia en el campo de las ciencias de la tierra, aportando información valiosa sobre las características geológico-estructurales del subsuelo.

En nuestro país, se distinguen dos tipos de entornos topográficos. El primero (tipo 1), corresponde a zonas con relieve bajo y regular, como en la Cuenca del Lago de Maracaibo, Delta Amacuro y Llanos centrales y occidentales; y por otro lado, se encuentran las zonas de topografía alta e irregular (tipo 2), como los Andes, Escudo de Guayana y Cordilleras Occidentales, Centrales y Orientales. Es conocido que en las regiones tipo 2 es limitada la disposición de datos de gravedad terrestres de calidad, debido a la dificultad asociada a la adquisición bajo esas condiciones y a la inexacta estimación de la cota en las estaciones.

En estudios recientes, como el de García (2009), se han generado resultados preliminares de buena calidad al disponer de datos satelitales gravimétricos de alta resolución, que abarcan todo el territorio nacional y que además tienen la ventaja de ser de dominio público y fácil acceso.

No obstante, es importante establecer un método de calificación de estas mediciones satelitales a través de la comparación con datos medidos en tierra, y compilados en las bases de datos utilizadas durante los últimos 60 años por diversos intérpretes a nivel nacional e internacional. Esta investigación se propone emplear la geoestadística como herramienta fundamental para la calibración y validación de los datos satelitales, en función de los datos terrestres, para establecer hipótesis sobre los posibles errores de observación y sus causas asociadas.

1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

El estudio se realizó en dos regiones con características geomorfológicas diferentes, con la finalidad de evaluar el efecto de la topografía en los valores finales de Anomalía de Bouguer para los datos satelitales y terrestres.

La primera región corresponde al área occidental de la Faja Petrolífera del Orinoco (Bloque Boyacá y parte del Bloque Junín) comprendida por los meridianos $64^{\circ}30'O$ y $68^{\circ}00'O$ y los paralelos $7^{\circ}30'N$ y $9^{\circ}15'N$. (Figura 1).

La segunda región abarca parte de la región central del país, específicamente la Cordillera de la Costa, localizada entre los meridianos $66^{\circ}00'O$ y $67^{\circ}00'O$ y los paralelos $9^{\circ}25'N$ y $10^{\circ}40'N$. (Figura 1.1).

La tercera parte del estudio consta de un análisis gravimétrico en distintos puntos repartidos sobre todo el territorio nacional, los cuales corresponden a estaciones de la Red Gravimétrica Nacional (RGN) medida sobre estaciones geodésicas de primer orden.

El dato horizontal usado está referido al elipsoide World Geodetic System 1984 (WGS84), mientras que el dato vertical se refiere al nivel medio del mar. Igualmente, se usó el Sistema de Coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) Zona 19 N.

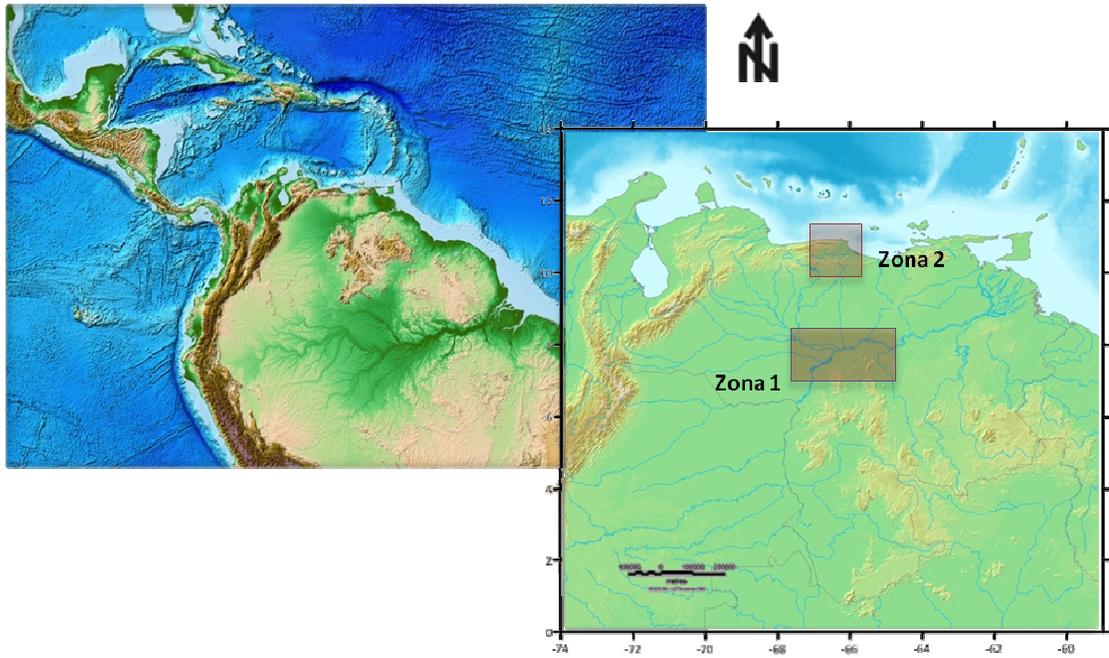


Figura 1.1. Mapa de ubicación de la zona en estudio. Nótese en el recuadro marrón la zona 1 correspondiente a Faja Petrolífera y en rojo la Cordillera de la costa o zona 2.

1.3 APORTES DE LA INVESTIGACIÓN

Las adquisiciones satelitales han permitido un rápido acceso a datos gravimétricos mundiales, lo cual es esencial para el progreso del estudio de la geodinámica global, entre otras aplicaciones importantes en las ciencias de la Tierra. En vista de esto, se requiere analizar los datos satelitales mediante el uso de herramientas estadísticas y espaciales, con la finalidad de certificar su calidad para la realización de estudios de gravimetría en cualquier región del país. Esto consecuentemente reorientaría las campañas de adquisición terrestre y los costos operacionales, tanto a nivel empresarial como académico, debido a que estos datos satelitales son fácilmente accesibles.

Por otro lado, en el ámbito geodésico, la importancia de estos levantamientos satelitales es crucial, ya que se requiere de la disposición de una base de datos de gravedad regular y precisa como la que ofrece la adquisición satelital, para calcular el geoide que mejor se ajusta a nuestra superficie territorial. Por ello, a partir de esta

investigación se estarían validando estos datos para el uso en esta disciplina en nuestro país.

Finalmente, a nivel regional, los mapas de gravedad generados permitirán analizar la respuesta gravimétrica en términos de las características geológico-estructurales del subsuelo con una mejor resolución.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Bajo estas consideraciones, el presente trabajo pretende evaluar la calidad de los datos gravimétricos satelitales en base a un análisis geoestadístico comparativo, tomando como información referencial de análisis los datos gravimétricos terrestres.

Con el fin de lograr esa meta se requiere, durante el desarrollo de la investigación:

- Realizar un análisis geoestadístico detallado de los datos de tierra y satélite, que incluya estadística descriptiva básica y estadística espacial.
- Cuantificar las diferencias entre los datos satelitales y terrestres en las zonas de interés.
- Determinar las posibles causas que generan las diferencias entre los datos satelitales y terrestres.
- Elaborar los mapas de Anomalía de Bouguer de las regiones de interés empleando los datos satelitales y terrestres.
- Realizar un análisis comparativo entre los mapas de Anomalía de Bouguer generados para los datos satelitales y terrestres, en función de la respuesta gravimétrica de las estructuras presentes en las zonas en estudio.
- Comparar valores observados de gravedad terrestre y satelital a partir de la Red Gravimétrica Venezolana de primer orden.

CAPÍTULO II

BASE TEÓRICA

2.1 ESTADÍSTICA BÁSICA

La estadística estudia los métodos científicos para recopilar, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis. En nuestros días, la estadística se ha convertido en un método efectivo para describir fenómenos en diferentes ámbitos, y sirve como herramienta para relacionarlos y analizarlos. El trabajo estadístico no consiste solamente en reunir y tabular datos, también abarca la interpretación de la información. Para extraer información primaria de los datos, se emplea la estadística descriptiva, la cual permite describir y resumir los datos.

2.1.1 Estadística descriptiva

Es claro que los hallazgos numéricos de un estudio deben ser presentados concisamente y de una manera tal que cualquier observador pueda obtener rápidamente las características esenciales de los datos. Unas de las herramientas más útiles para este fin son las medidas de tendencia central y medidas de dispersión, las cuales se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Descriptivos estadísticos. Tomado de Wampole (1999) y Ross (2004).

Tipo	Descriptivo	Definición	Expresión general
Tendencia Central	Media	Promedio numérico del número total de observaciones.	$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$
	Mediana	Valor de la variable que divide el conjunto de datos en dos partes iguales al ordenarlos.	Si n es impar: $X_{(n+1)/2}$ Si n es par: $X_{(n/2)} + X_{(n/2)+1}$
	Moda	Valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos.	-
Dispersión y momento	Desviación estándar	Media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.	$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$
	Varianza	Media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística.	$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$
Posición	Percentil	Valor de la variable que indica el porcentaje de una distribución que es igual o menor a esa cifra.	$P_k = \frac{k \cdot N}{n_k}$ con $k=1,2,3,\dots,n$
Bivariado	Correlación	Determina la relación o dependencia que existe entre las dos variables que intervienen en una distribución bidimensional.	$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$
	Covarianza	Es una medida de la naturaleza de la asociación entre dos variables. El signo de la covarianza indica si la relación entre dos variables dependientes es positiva o negativa.	$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$

De igual manera, durante la realización de análisis de datos, se emplean con mucha frecuencia los denominados gráficos estadísticos, los cuales son en ocasiones los medios más efectivos no sólo para describir y resumir la información, sino también para analizarla.

Estos gráficos son muy difundidos y a menudo los más convenientes para presentar datos, son útiles para obtener una representación visual de la totalidad de la información de tal modo que se puedan percibir fácilmente los hechos esenciales y compararlos con otros. La tabla siguiente muestra los más importantes y los que se utilizarán durante el desarrollo del trabajo:

Tabla 2.2. Gráficos estadísticos básicos. Tomado de Dalgaard (2002).

Gráfico	Definición	Utilidad
Diagrama de caja y bigotes	Está basado en los cuartiles de la distribución y consta de un rectángulo (caja), y dos brazos (bigotes).	Suministra información sobre los valores mínimos y máximos, los cuartiles y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.
Histograma de frecuencia	Representación gráfica de una variable en forma de barras. Se obtiene a partir de un eje horizontal dividido en intervalos iguales y una escala vertical que indica la frecuencia o número de veces que se repite en un conjunto dado cada intervalo.	Análisis del comportamiento de la variabilidad de los resultados. Expone gráficamente números, variables y cifras de modo que los resultados se visualicen más clara y ordenadamente.
Q-Q	Método gráfico para el diagnóstico de diferencias entre la distribución de probabilidad de una población de la que se ha extraído una muestra aleatoria y una distribución usada para la comparación.	Comprobar la normalidad de la variable numérica, al permitir observar donde los datos se ajustan mejor a la distribución.
Dispersión	Tipo de diagrama usando coordenadas cartesianas para mostrar valores de variables. La variable dependiente se grafica en el eje Y y la independiente en el eje X.	Detecta relación lineal y si es positiva o negativa, datos fuera de rango. Permite inspeccionar la calidad de los datos.

2.2 CORRELACIÓN LINEAL Y ANÁLISIS DE REGRESIÓN

El análisis de regresión lineal y de correlación comprende el análisis de los datos para establecer como dos o más variables están relacionadas entre sí. Este procedimiento da como resultado una ecuación matemática que describe cierta relación determinada. La ecuación puede usarse para estimar o predecir los valores de una variable cuando se conocen o se suponen conocidos los valores de la otra variable (Gujarati, 2004).

La regresión lineal simple es una prueba para establecer una función matemática expresada por una recta, que describa la relación entre dos variables.

El modelo de regresión lineal simple, supone que el valor medio de y para un valor dado de x se grafica como una línea recta y que los puntos se desvían de esta línea de medias en una cantidad aleatoria (positiva o negativa) igual a ε , es decir,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (1)$$

Donde β_0 y β_1 son (valor medio de y para una x dada) son parámetros desconocidos de la porción determinística del modelo, mientras que ε es el error aleatorio asociado. En este caso, la media de la distribución de probabilidad de los errores debe ser cero y la varianza constante para todos los valores de la variable independiente x .

Los valores β_0 y β_1 se denominan intercepto y pendiente respectivamente, y se calculan basándose en los datos muestrales. Se considera entonces, la ecuación de la recta que “mejor se ajuste” a los datos (recta de mínimos cuadrados).

2.2.1 Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es uno de los más empleados y se basa en la suposición de que la suma de las desviaciones verticales de los puntos con relación a la recta es cero y que la suma de los cuadrados de esas desviaciones es mínima. (Gujarati, 2004).

Las fórmulas para las estimaciones de mínimos cuadrados son:

$$\text{Pendiente: } \hat{\beta}_1 = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} \quad (2)$$

$$\text{Ordenada al origen: } \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (3)$$

Donde,

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad ; \quad SS_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

2.2.2 Coeficiente de correlación de Pearson

En particular, se quiere cuantificar la intensidad de la relación lineal entre dos variables. El parámetro que permite tal cuantificación es el coeficiente de correlación lineal de Pearson r , cuyo valor oscila entre -1 y $+1$. El valor de r se aproxima a $+1$ cuando la correlación tiende a ser lineal directa (mayores valores de x significan

mayores valores de y), y se aproxima a -1 cuando la correlación tiende a ser lineal inversa.

$$r = \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xx} \cdot SS_{yy}}} \quad (5)$$

Es importante aclarar que aunque el análisis de regresión muestre que existe dependencia de una variable sobre la otra, esto no implica necesariamente una relación de causalidad.

2.2.3 Prueba de utilidad del modelo lineal.

Una vez calculada la recta ajuste con el modelo de regresión lineal, el siguiente paso consiste en analizar si la regresión, en efecto, es válida y puede ser utilizada para realizar predicciones. Para ello se comprueba si la correlación entre ambas variables es distinta de cero o si el modelo de regresión es válido determinando si la variable endógena (y) puede ser explicada a través de la influencia de la variable explicativa (x); es decir, se quiere probar la hipótesis nula de que x no contribuye con información a la predicción de y , contra la hipótesis alternativa de que estas variables tienen una relación lineal con una pendiente distinta de cero (Wampole, 1999).

El estadístico (t-Student) que se utiliza para realizar la prueba es el siguiente:

$$t = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{S_{\hat{\beta}_1}} \approx t\left(n - 2, \frac{\alpha}{2}\right), \text{ donde } S_{\hat{\beta}_2} = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - \hat{\beta}_0 \sum Y - \hat{\beta}_1 \sum XY}{(n-2)\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}\right]}} \quad (6)$$

donde $t(n-2, \alpha/2)$ es el valor asociado a una t-Student con $n-2$ grados de libertad que deja a su derecha un área de $\alpha/2$ (o, equivalentemente, deje a su izquierda un área de $1 - \alpha/2$).

2.3 ESTADÍSTICA ESPACIAL: GEOESTADÍSTICA

Los propósitos fundamentales al aplicar la geoestadística son los de estimar, predecir y simular variables regionalizadas. Cada observación pertenece a dos espacios: el geográfico (coordenadas hasta tres dimensiones) y el espacio de las propiedades (Atributo o variable observada), que puede tener tantas dimensiones como número de variables observadas (Ambrosio, 2007).

La visualización de datos representa una etapa importante del análisis geoestadístico, dado que puede aportar información sobre tendencias. Para ello se emplean los siguientes descriptivos de estructura espacial:

Tabla 2.3. Gráficos espaciales básicos. Tomado de Dalgaard (2002) y Ambrosio (2007).

Descriptivo	Definición
Mapa de percentiles	<ul style="list-style-type: none">▪ Es un gráfico elaborado a partir de cuantiles que resulta ser muy práctico para describir la variación o dispersión en un conjunto de datos. Estos datos se representan en forma de colores graduados, donde los valores se clasifican de acuerdo al cuantil al que pertenecen.▪ En los mapas de cuantiles, los datos pertenecientes a los distintos percentiles tienden a agruparse y esto refleja una tendencia espacial. Generalmente se emplean para revelar problemas con las distribuciones de variables.
Mapa de burbujas	<ul style="list-style-type: none">▪ Es un diagrama que emplea círculos como símbolos de graficación, en el cual el radio de los círculos es proporcional a los valores de la variable. Es decir, los círculos con área mayor corresponden a datos con valores altos y viceversa.▪ En los mapas de burbujas los máximos y mínimos se agrupan formando conglomerados, con lo cual es posible observar en que zonas específicamente se encuentran los valores extremos.

Igualmente es necesario evaluar la auto correlación espacial, la cual aporta información sobre las relaciones entre las variables regionalizadas muestreadas y diferentes localizaciones. El variograma es una de las medidas más comunes de continuidad espacial, la cual permite cuantificar la continuidad, anisotropía y propiedades acimutales del conjunto de datos medidos.

2.3.1 Variograma

Es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada. Sirve para detectar direcciones de

anisotropía, zonas de influencia y su extensión (correlación espacial) y variabilidad con la distancia. El variograma no depende de los valores de los datos, depende de su relación espacial.

El valor del variograma $\gamma(h)$ es el valor esperado (promedio) de la diferencia entre los valores de la variable para todos los pares de puntos separados por una distancia h . La diferencia se eleva al cuadrado para que siempre sea positiva y la esperanza se multiplica por 0.5 porque cada par de puntos es tomado en cuenta dos veces (Ambrosio, 2007).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (7)$$

Donde,

x : ubicación de la observación

h : distancia entre dos observaciones

$Z(x)$: Valor de la propiedad observada en la posición x

2.3.2 Variograma experimental

Está basado en los valores contenidos en el conjunto de datos, y es calculado como paso preliminar al proceso de kriging. El variograma experimental (Figura 2.2) sirve como un patrón para el modelo de variograma, el cual es usado como guía durante el proceso de kriging. Para estimar los valores del variograma teórico se define la fórmula del variograma experimental, ésta es aplicada directamente a los datos de la muestra:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = |h|} (z(x_i) - z(x_j))^2 \quad (8)$$

El variograma experimental se construye de la siguiente forma:

- Se elige una dirección θ

- Se escoge un espaciamento h (Figura 2)
- Se calcula el valor de γ^* para cada múltiplo de h ($h, 2h, 3h\dots$)
- Se grafica γ^* contra las distancias ($h, 2h, 3h\dots$)

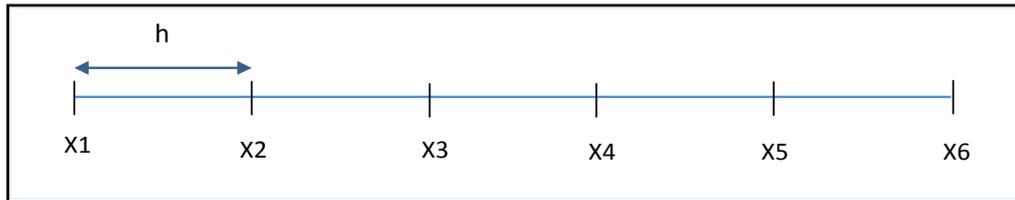


Figura 2.1 Espaciamento h entre datos en una dimensión.

Luego, Cada punto representa el valor del variograma a distancia h :

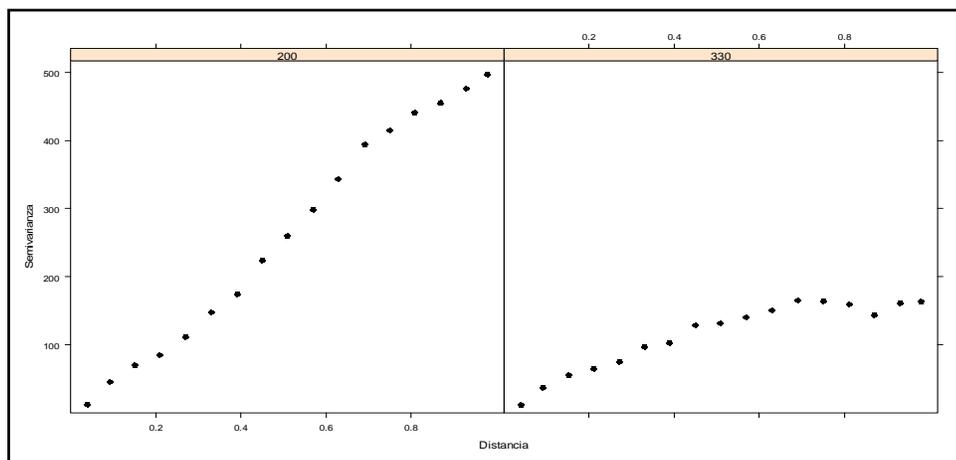


Figura 2.2. Variograma experimental de datos en dos dimensiones.

El método descrito supone datos igualmente espaciados, es decir, ubicados sobre un mallado (Figura 2.3). Es este caso para cada dirección habrá una distancia h tal que siempre se encontrará un punto en $x + nh$ y en la dirección θ escogida (Ambrosio, 2007).

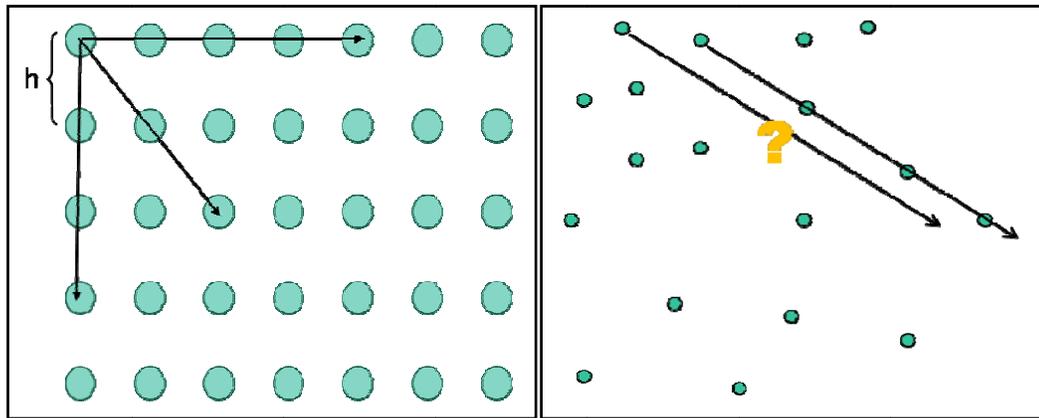


Figura 2.3. Distribución regular de datos en una red y distribución irregular de datos.
Modificado de Ambrosio (2007)

Por supuesto que en la mayoría de los casos, los datos no se encuentran ubicados en una red, sino distribuidos irregularmente, por lo cual es necesario garantizar que se utiliza la mayor cantidad de información posible. Para ello, se definen tolerancias bajo las cuales los puntos cumplen las condiciones de manera aproximada. Estas tolerancias van relacionadas con la distancia (Figura 2.4) y con el ángulo de búsqueda (Figura 2.5).

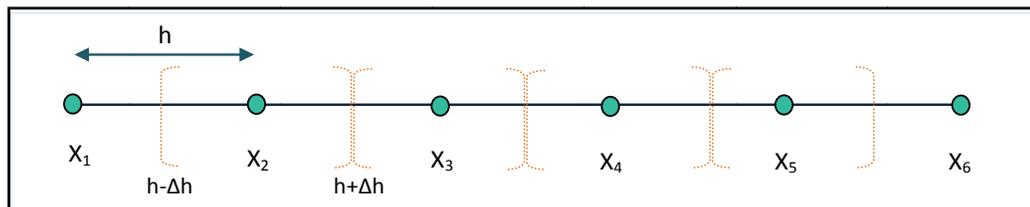


Figura 2.4. Tolerancia con la distancia (Δh). Modificado de Ambrosio (2007).

Las tolerancias establecen las condiciones de búsqueda, con lo cual se puede aprovechar al máximo la información. Sin embargo, es necesario establecer un balance entre buena cobertura y precisión. Un criterio para seleccionar el número máximo de distancias h (o lags) es que debe ser menor o igual a la mitad de la máxima distancia entre las observaciones, lo cual se puede calcular a partir de la distancia promedio entre las observaciones o empleando la nube de variograma. En general, se procura tener la mayor cantidad posible de lags, pero evitando que estos

consideren muy pocos puntos y es deseable que el ángulo θ coincida con la dirección de anisotropía de la variable (Ambrosio, 2007).

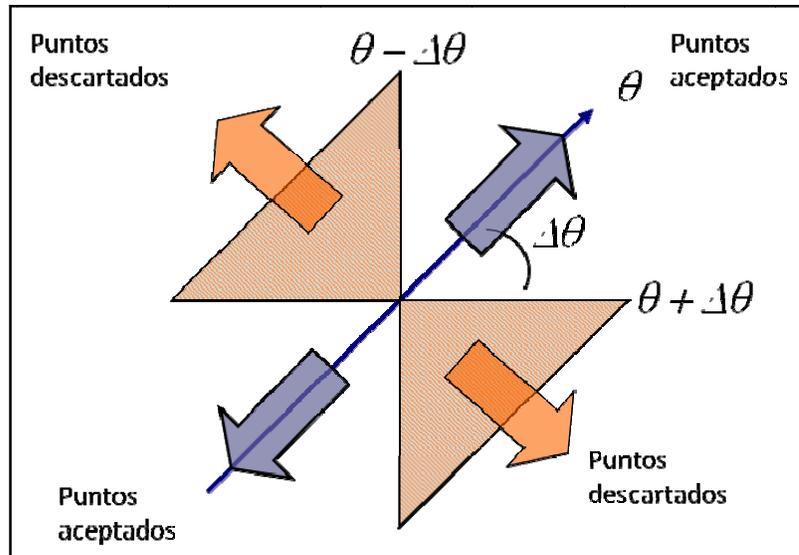


Figura 2.5. Tolerancia con el ángulo ($\Delta\theta$). Los puntos aceptados por el variograma se encuentran dentro de un intervalo $\theta + \Delta\theta$.

De igual manera, para definir completamente un variograma se requiere tomar en cuenta los parámetros considerados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros del variograma. Tomado de Ambrosio (2007).

Parámetro	Definición	Interpretación
Meseta	El modelo de variograma tiende a alcanzar un estado asintótico que se denomina meseta o sill.	Representa la máxima varianza del modelo de variograma
Rango	Distancia h (lag) a la cual la meseta es alcanzada por el variograma.	Representa la máxima distancia de separación a la cual un punto podrá ser correlacionado con cualquier otro en el conjunto de datos.
Efecto pepita	Discontinuidad cerca del origen	Varianza residual o variabilidad espacialmente independiente que ocurre a escalas por debajo del intervalo de muestreo de las observaciones.

2.3.3 Variogramas teóricos

Los variogramas experimentales son ajustados mediante estos modelos (también conocidos como autorizados), los cuales deben ser funciones monótonamente

crecientes, su máximo valor debe ser constante o asintótico y además debe satisfacer ciertas restricciones que permitan que el sistema de ecuaciones de kriging tenga solución.

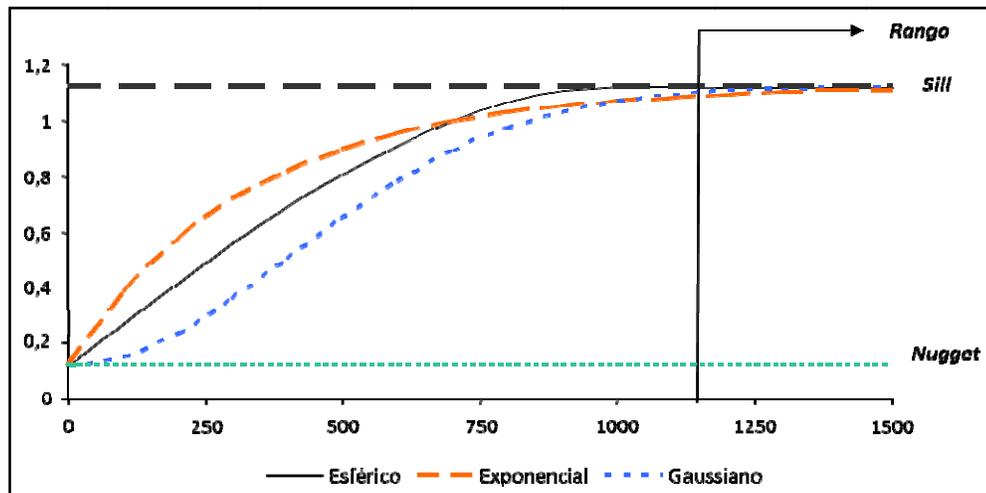


Figura 2.6. Parámetros del variograma y modelos autorizados.

Entre los modelos autorizados más comunes se encuentran (Figura 2.6):

- Modelo Esférico
- Modelo Exponencial
- Modelo Gaussiano

Los modelos deben ser elegidos en base a su ajuste, a los resultados de experiencias anteriores y a conocimiento sobre el área de estudio y sus condiciones.

2.3.4 Kriging

La predicción espacial de puntos a partir de una muestra es una de las principales aplicaciones de la geoestadística. Se conocen los valores de determinada propiedad en ciertos puntos, pero éstos se requieren en toda el área para poder elaborar mapas. En este sentido, los métodos geoestadísticos proveen una base firme tanto para la predicción como para la evaluación de los resultados obtenidos.

Un predictor local óptimo debe contar con las siguientes características:

- La predicción se realiza como un promedio ponderado (combinación lineal) de los datos conocidos.
- La predicción es condicional (insesgada y exacta en los puntos conocidos).
- Conglomerados de puntos son ‘reducidos’ a puntos únicos equivalentes, de esta forma el sobremuestreo en áreas pequeñas no sesga el resultado.
- Puntos cercanos en la muestra ‘enmascaran’ puntos más alejados en la misma dirección.
- La estimación del error se basa sólo en la configuración espacial de los puntos no en sus valores.
- La varianza del kriging debería ser tan pequeña como es posible.

Mediante el método de kriging el valor de la propiedad en cada punto no observado viene dado por la combinación lineal de las observaciones cercanas. (Ambrosio, 2007).

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad \text{con} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (9)$$

El método de Kriging ordinario (OK), permite considerar variaciones locales en la media al limitar el dominio de estacionariedad a la vecindad local centrada en el punto (ubicación) donde se requiere una estimación del valor del atributo.

2.3.5 Mínima curvatura

El método de mínima curvatura es ampliamente usado en las ciencias de la Tierra. Genera la superficie más suave posible tratando de honrar los datos tanto como sea posible. Este método produce un mallado al aplicar repetidamente una ecuación sobre el mallado en un intento por suavizarlo. Cada vez que el mallado es suavizado se cuenta una iteración. Los nodos son calculados hasta que los cambios sucesivos en los valores son menores a los máximos valores residuales, o el número máximo de iteraciones es alcanzado.

Las estimaciones de los valores de la malla por mínima curvatura a través del método de iteraciones se basan en el promedio de la distancia inversa de los datos reales dentro de un radio específico.

El método emplea los conceptos de tensión descritos en detalle por Smith y Wessel (1990). La rutina consta de cuatro pasos para generar el mallado final:

- Se ajusta en modelo de regresión a los datos.
- Los valores del modelo de regresión lineal en las localizaciones se extraen de los datos, lo cual genera un conjunto de datos residuales.
- El algoritmo de mínima curvatura es empleado para interpolar los residuales en los nodos del mallado.
- Los valores del modelo del plano de regresión en los nodos del mallado son añadidos a los residuales interpolados, obteniéndose la superficie final interpolada.

2.4 PROPIEDADES ESPACIALES DE LOS DATOS

La naturaleza frecuentemente se comporta en una forma difícil de comprender, y el ámbito geológico no es una excepción. Dado que se conoce que los datos provenientes de las ciencias de la Tierra son frecuentemente continuos en una dirección preferencial que en otra, casi siempre es necesario diseñar variogramas como estrategia para modelar las máximas y mínimas direcciones de continuidad.

Este concepto se encuentra muy relacionado con la anisotropía del medio, la cual se refiere a los cambios en una propiedad cuando se miden a lo largo de diferentes direcciones (Figura 2.7). En términos geoestadísticos, anisotropía se asocia a los modelos de covarianza que tienen mayores y menores rangos de distancias. Esta condición es más fácilmente vista cuando un variograma muestra un rango más largo en una dirección que en otra. En este modo, se reconocen dos tipos de anisotropía: la geométrica, donde los modelos de covarianza tienen la misma meseta pero diferentes

rangos; y la regional, que implica que los modelos de covarianza tienen el mismo rango pero diferentes mesetas (Dubrule, 2003).

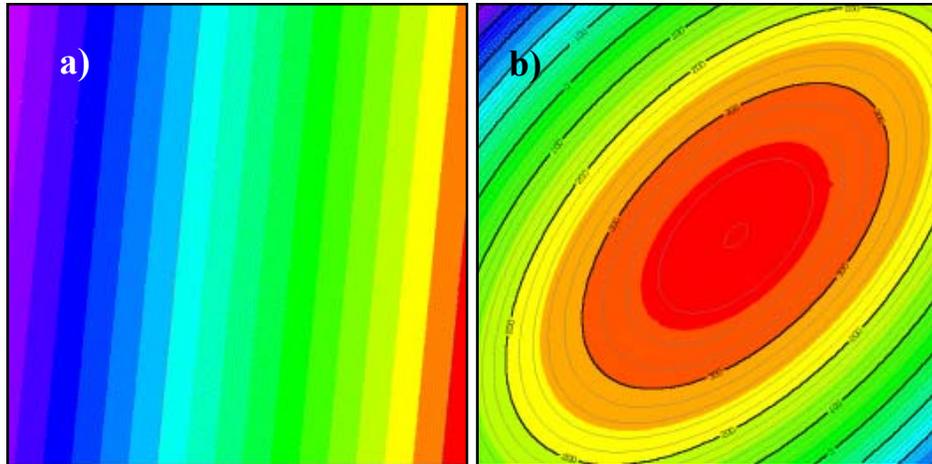


Figura 2.7. Superficies de tendencia. a) de primer orden. b) de segundo orden. El valor de la propiedad depende de la dirección donde se mida. (Tomado de <http://www.rockware.com>)

Igualmente es necesario hablar del concepto de estacionariedad de los datos, el cual es un proceso estocástico cuya distribución de probabilidad conjunta no cambia en tiempo o espacio. Significa entonces que los datos no exhiben ninguna tendencia, es decir, hay homogeneidad estadística espacial. Esto implica que al mover una ventana, en promedio habrá homogeneidad en la media y varianza a lo largo de toda el área en estudio.

En otras palabras, la media y la varianza son independientes de la ubicación:

$$E[Z(x)] = E[Z(x+h)] = m \quad (10)$$

$$\text{Var}[Z(x)] = \text{Var}[Z(x+h)] = \sigma^2 \quad (11)$$

La Figura 2.8 muestra una variable que varía alrededor de una media constante. En cualquier punto, el comportamiento de la variable, aunque complicado, puede ser calificado como “homogéneamente heterogéneo”. En promedio se comporta igual donde sea, en el sentido que se podría estimar el mismo error en cualquier locación si

se quisiera predecir el valor de la variable a partir de la línea horizontal (Dubrule, 2003).

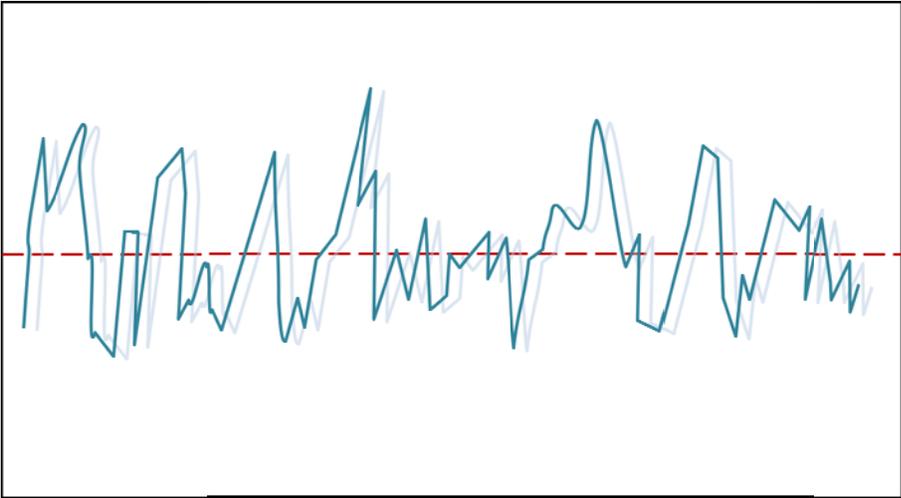


Figura 2.8. Variable estacionaria o sin tendencia. La variable en promedio tiene un comportamiento homogéneo. Modificado de Drubule (2003).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA APLICADA

3.1 FUENTE DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS

3.1.1 Faja Petrolífera del Orinoco

Los datos de anomalías gravimétricas terrestres (Figura 3.1) fueron extraídos del trabajo publicado por Rodríguez (1977) como parte de un proyecto de investigación del Departamento de Geofísica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela en convenio con el Fondo Nacional de Investigación (FONINVES).

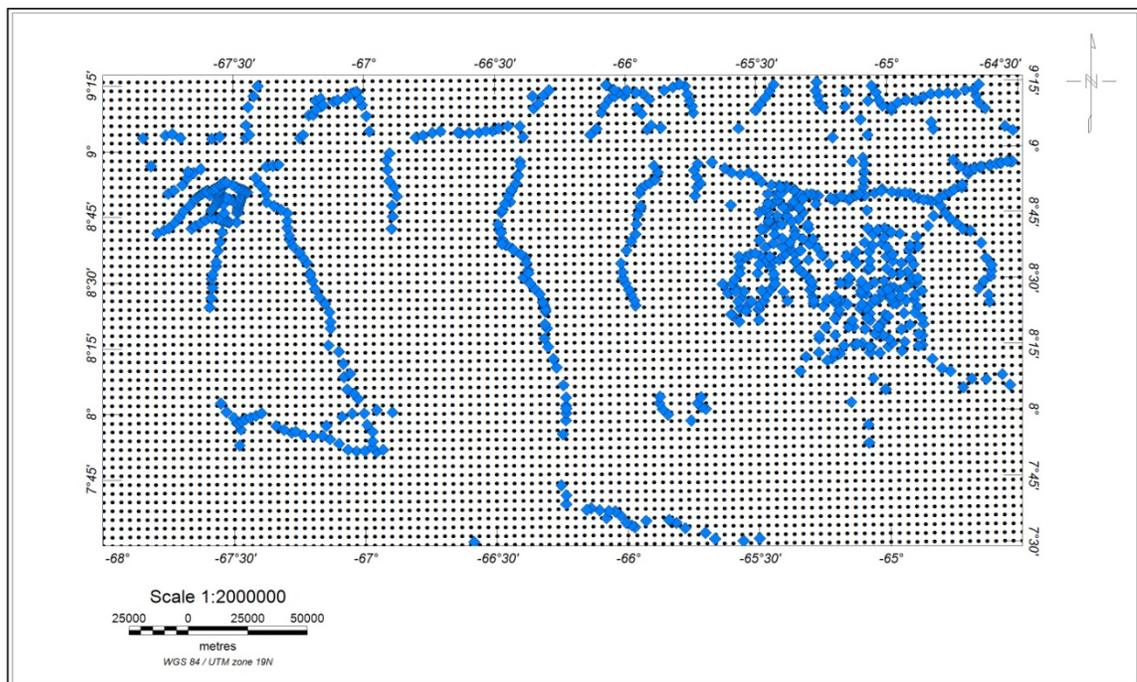


Figura 3.1. Mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas. Las estaciones en azul son las estaciones terrestres, mientras que los puntos negros representan la localización de las estaciones satelitales. Nótese la mayor cobertura de los datos satelitales respecto a los terrestres.

Se recopilaron un total de 765 estaciones de gravedad, que contenían adicionalmente información relativa a coordenadas y topografía. Asimismo, los datos son el resultado

de una compilación de varias bases de datos: Cartografía Nacional (CN), Ministerio de Minas e Hidrocarburos (MMH), Socony-Vacuum Oil Co – Mobil (SOC) y Universidad Central de Venezuela (UCV), cuya distribución espacial se muestra en la Figura 3.1. Cabe destacar que el procesamiento de estos datos gravimétricos fue realizado con una densidad de reducción igual a 2.23 g/cm^3 .

Por otro lado, los datos satelitales (Figura 3.1) fueron obtenidos a partir de García (2009), los cuales se encuentran disponibles en la página web de la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (www.abae.gob.ve). El total de estaciones gravimétricas localizadas dentro del área es de 5724 estaciones, espaciadas una distancia de 3.7 km y originalmente fueron reducidos con una densidad de 2.67 g/cm^3 . Sin embargo, para hacer más adecuada la comparación con los datos de AB terrestres, se reprocesaron los datos con una densidad de Bouguer igual a 2.23 g/cm^3 .

3.1.2. Cordillera de la Costa

Los datos gravimétricos terrestres de la Cordillera de la Costa empleados en esta etapa fueron recopilados de diversas fuentes bibliográficas. Entre estas se encuentran los estudios gravimétricos realizados por Ambrosio (2002), Ruíz (1989), Orihuela (1990), curso de Geofísica de Campo 2004 y datos pertenecientes a la Red Gravimétrica Nacional (RGN). El número total de datos fue de 1904 estaciones de gravedad con una densidad de Bouguer igual a 2.67 g/cm^3 .

Por otro lado, los datos satelitales (Figura 3.2) forman parte del Trabajo Especial de Grado realizada por García (2009). Presentan un intervalo de muestreo de 3.7 km y densidad de reducción de 2.67 g/cm^3 , para un total de 1979 estaciones.

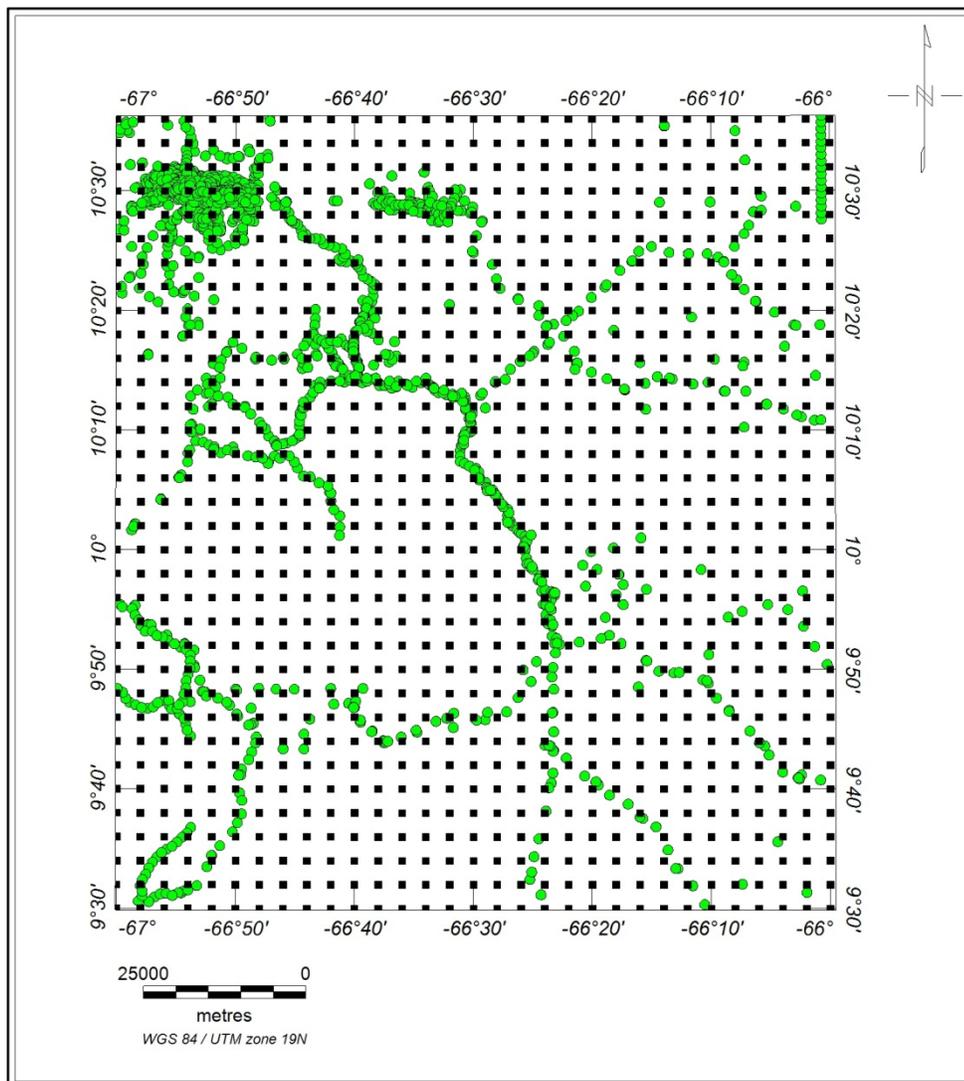


Figura 3.2. Mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas terrestres (color verde) y satelitales (cuadros negros) pertenecientes a Cordillera de la Costa.

3.1.3. Red gravimétrica nacional

Los datos pertenecientes a la red gravimétrica de primer orden fueron tomados de los trabajos de Rodríguez y Graterol (1975) y Graterol (1994). Se recopilieron un total 93 estaciones de gravedad absoluta, distribuidas a lo largo de todo el país y abarcando distintas provincias topográficas (Figura 3.3).

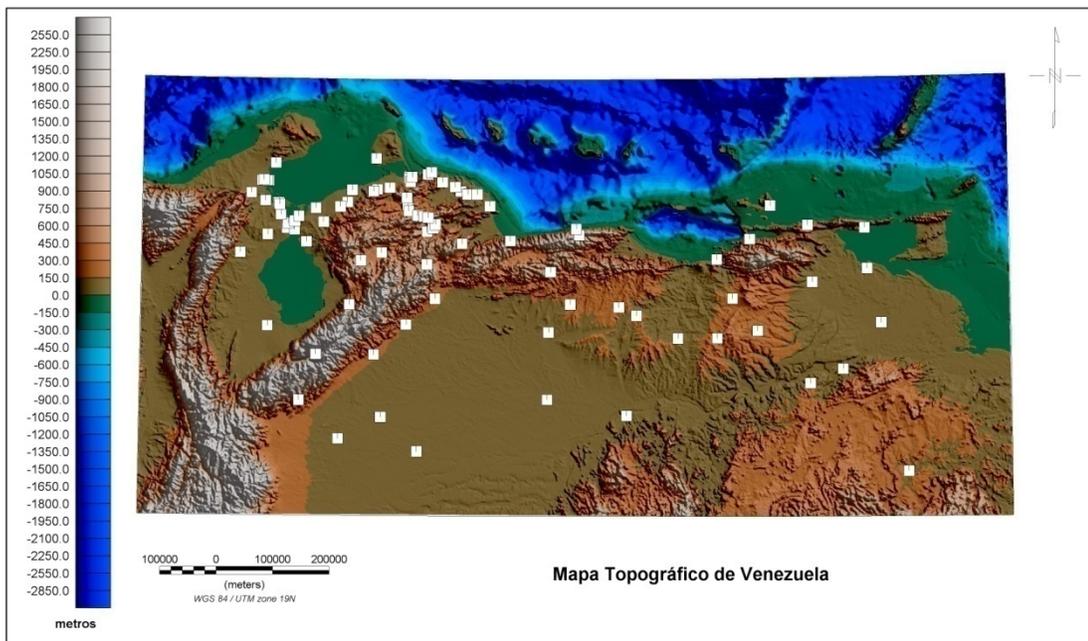


Figura 3.3. Mapa topográfico de Venezuela con estaciones de gravedad terrestre de primer orden (cuadros blancos).

La mayoría de las estaciones además, contaban con información propia de elevación y se clasificaron por intervalos para facilitar el posterior análisis. La tabla siguiente muestra la leyenda.

Tabla3.1. Clasificación de las estaciones de gravedad absoluta por intervalos de elevación.

ID Cota	1	2	3	4	5
Intervalo	0-200 m	201-1000 m	1001-2000 m	>2000 m	NA

De estas estaciones, aproximadamente el 66% presentan topografía suave y regular (tipo 1), 25% están ubicadas en zonas sobre los 200 metros de altura (tipo 2), tan sólo el 2% corresponden con zonas de alta elevación (tipo 3) y un 7% de los datos no presentaba información de topografía. Igualmente, no hay estaciones de gravedad absoluta por encima de los 2000 metros de altura (Figura 3.4).

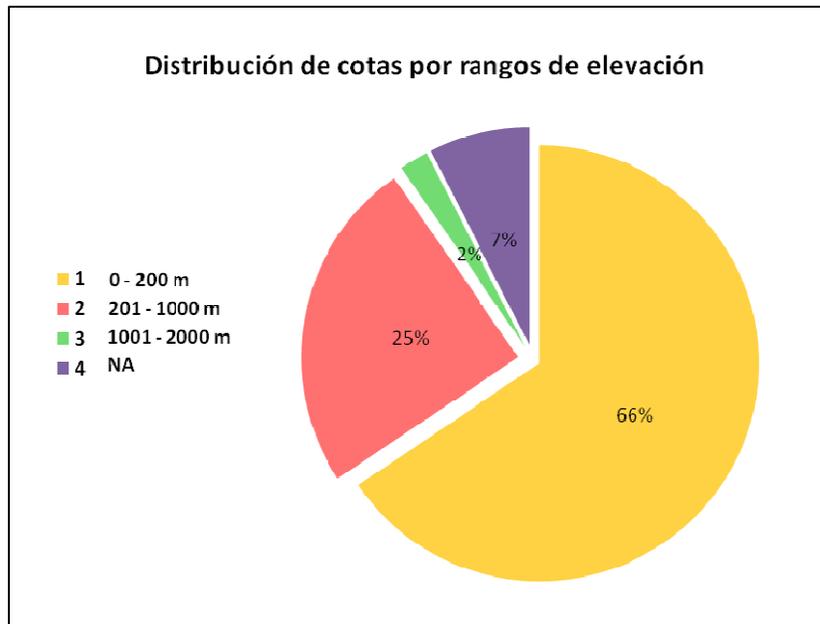


Figura 3.4. Gráfico de distribución de cotas de estaciones por rangos de elevación. La mayoría de las estaciones presentan cotas por debajo de los 200 metros.

Las estaciones de gravedad empleadas forman parte de levantamientos planificados que se inician en 1970 y que conformarían la hoy conocida Red Gravimétrica Nacional de primer orden (RGN), la cual sirvió como red fundamental para los levantamientos gravimétricos en el país de redes secundarias posteriores.

3.2 MUESTREO DE LOS DATOS

Los datos de anomalía de Bouguer satelital y terrestre presentan resolución diferente. Los datos de AB terrestres tienen una resolución variable a lo largo de toda el área, es decir, hay zonas donde existe mucha densidad de estaciones y zonas con escasos de datos; inclusive en algunos sitios la resolución de los datos de tierra supera a la resolución satelital. Por ello, se decidió realizar un procedimiento especial a los datos para llevar todo a una resolución única.

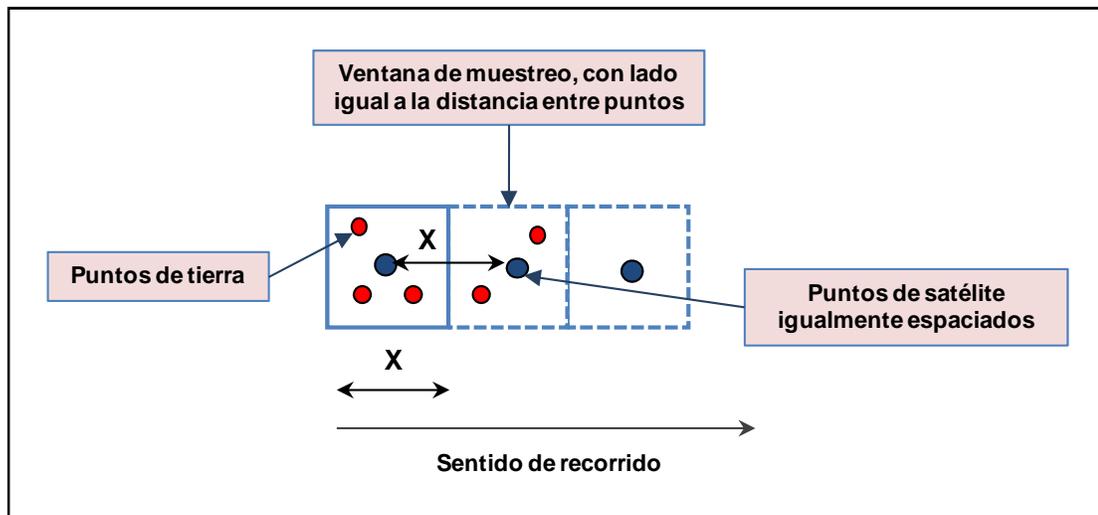


Figura 3.5. Esquema del procedimiento para muestrear los datos de satélite y tierra.

Este proceso se hizo programando una rutina en R project (Apéndice A1) que recorre todos los datos del modelo combinado y busca en una ventana el número de puntos de tierra contenidos dentro de ella (Figura 3.5). Si ningún punto cae en la ventana, entonces este punto del modelo no es tomado en cuenta. Si por el contrario hay puntos de tierra dentro de la ventana, entonces se calcula un único valor de anomalía de Bouguer terrestre y topografía ponderando por el inverso de la distancia al cuadrado. La finalidad de este paso es precisamente muestrear solamente aquellos datos combinados con datos satélite que posean un equivalente en tierra, para poder hacer la comparación estadística punto a punto.

Por otro lado, se construyó un segundo programa de muestreo en lenguaje Matlab (Apéndice A2) para llevar todo a una resolución única. El proceso de muestreo es distinto al aplicado anteriormente (Figura 3.6), a partir de los cuatro vecinos más cercanos y posterior asignación al ponderar por el inverso de la distancia del punto buscado (tierra) a cada uno de sus vecinos (satélites).

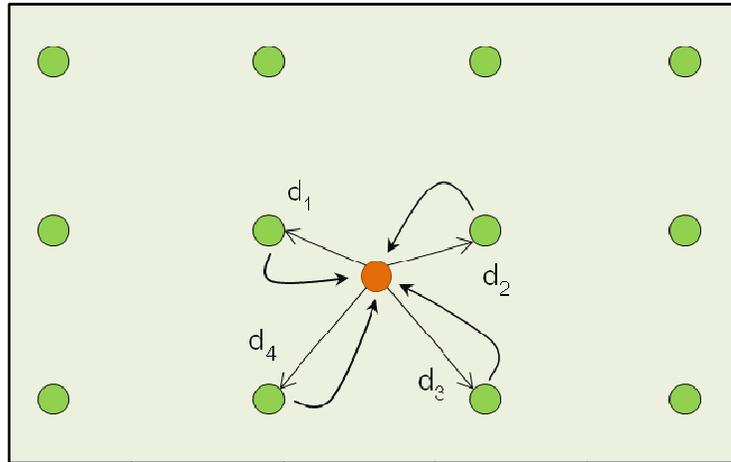


Figura 3.6. Esquema del procedimiento para muestrear los datos de satélite y tierra.

3.3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Una vez llevados los datos a resolución única, el siguiente paso fue aplicar la metodología estadística necesaria para realizar las comparaciones entre los datos satelitales y los datos terrestres. La Figura 3.7 muestra un esquema general del proceso estadístico aplicado a los datos satelitales y terrestres.

La estadística básica comprende el cálculo de los descriptivos básicos, así como la generación de los histogramas de frecuencia, gráficos QQ, diagramas de caja y bigotes (Boxplot) y gráficos de percentiles para evaluar numéricamente el comportamiento de las variables implicadas, en función de su distribución de probabilidad.

El análisis de regresión consta de la aplicación de modelos lineales con la finalidad de observar tendencias en conjunto entre las variables gravimétricas, topográficas y geográficas. Al remover las tendencias se realiza la evaluación de los residuales correspondientes y se determina si el proceso continúa o si el modelo planteado satisface las variabilidades encontradas para cada caso.

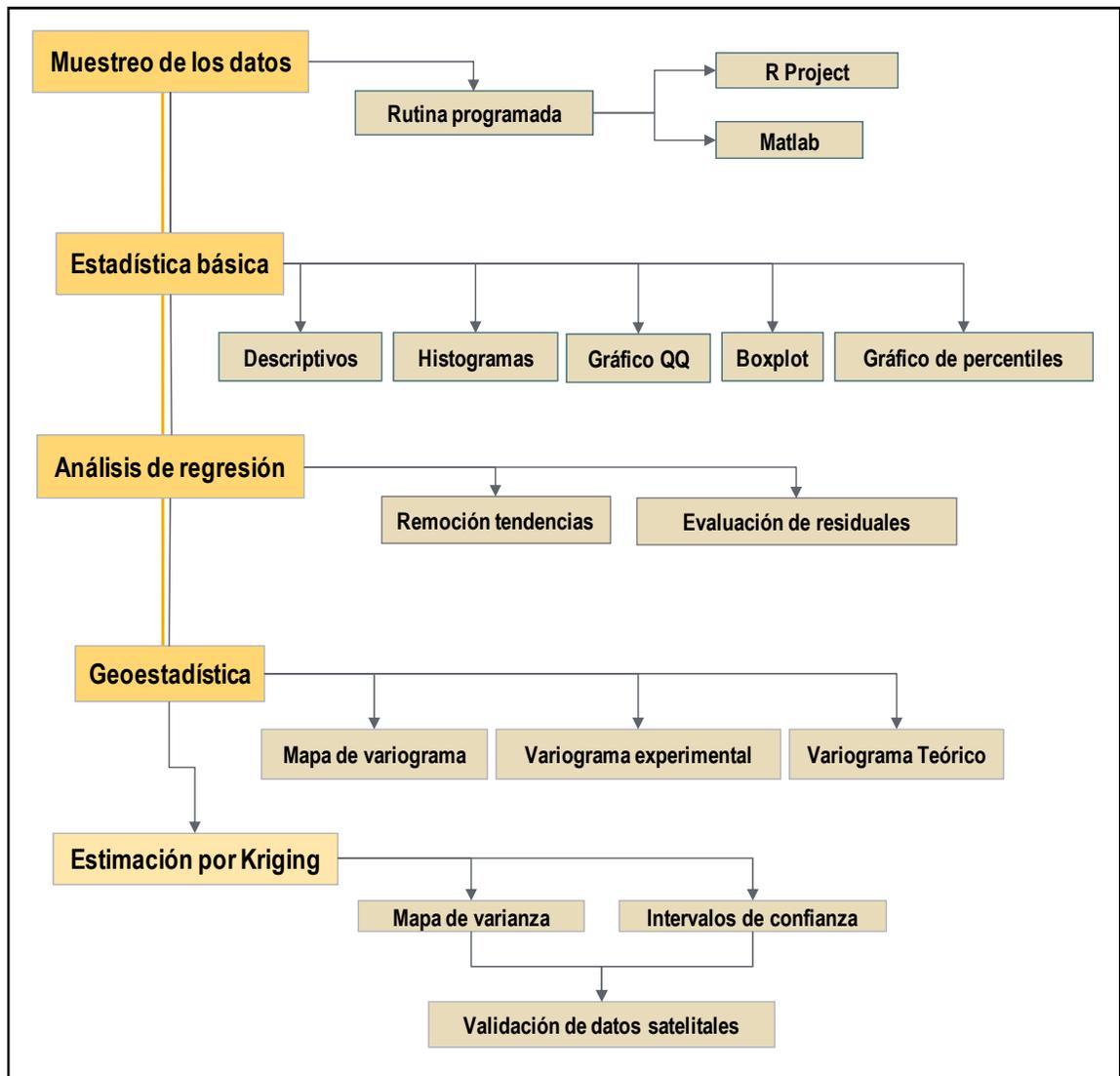


Figura 3.7. Metodología estadística empleada durante la comparación numérica y espacial de los datos satelitales y terrestres.

La metodología estadística está conformada por 4 pasos principales. En principio, se genera el mapa de variograma de la variable en cuestión, con el objetivo de determinar las direcciones de anisotropía (máxima y mínima continuidad). Luego a partir de estas direcciones se generan los variogramas experimentales, los cuales deben ser ajustados a partir de un modelo teórico con unos parámetros dados, como etapa antecedente al kriging.

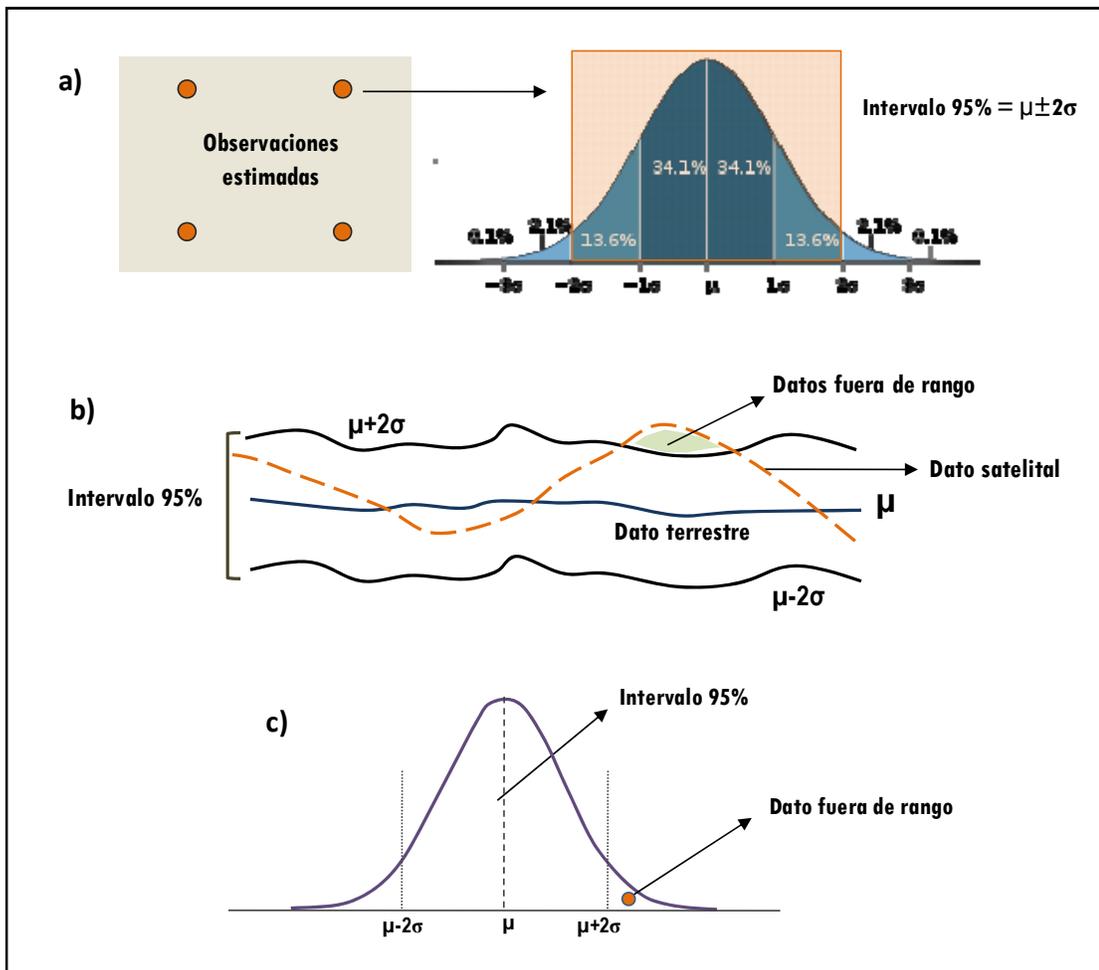


Figura 3.8. Límites de incertidumbre. a) Cada estimación contiene información sobre su distribución en términos de su media y varianza, con lo cual se puede definir el intervalo de 95% equivalente a sumar o restar dos veces la desviación estándar a la media. b) Una vez definidas las superficies se verifica si la superficie correspondiente a los datos satelitales se encuentra dentro de los límites establecidos o si se encuentran fuera de rango (zona en color verde). c) Un dato fuera de rango equivale a que se encuentre por fuera de la distribución del punto terrestre correspondiente.

Adicionalmente a las predicciones de la variable, el Kriging también ofrece como resultado la varianza de las predicciones para cada observación. El cálculo de la varianza al momento de resolver las ecuaciones de Kriging permite establecer intervalos de confianza alrededor de los valores estimados (95%) y se determina qué porcentaje de los datos se encuentran dentro de los límites de incertidumbre de la variable (Figura 3.8).

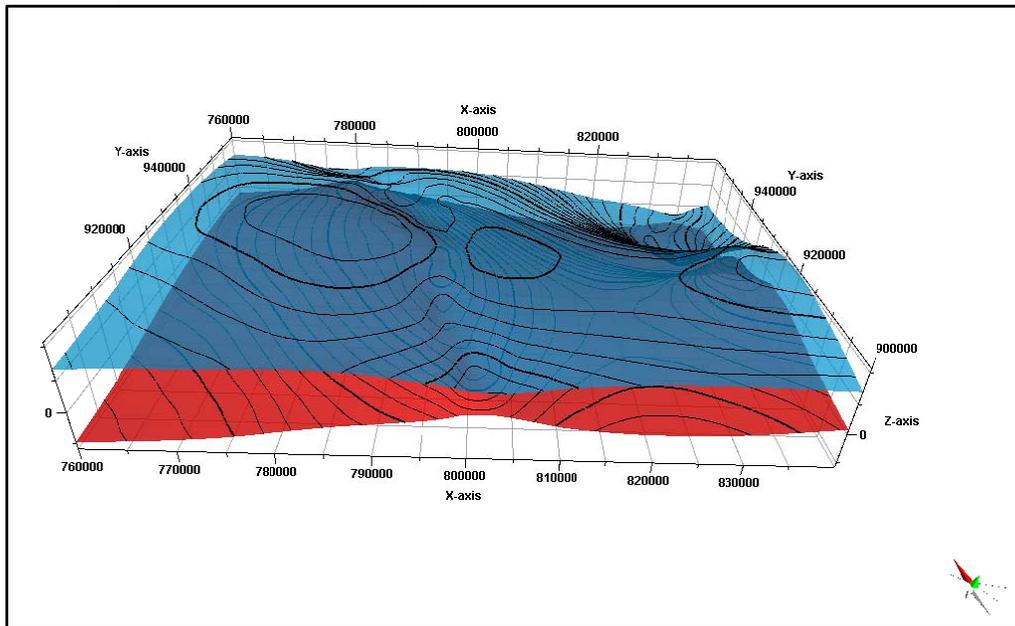


Figura 3.9. Superficies asociadas a los límites de incertidumbre permitidos por la variable. En azul se muestra la superficie asociada al límite superior $\mu+2\sigma$. En rojo, la superficie correspondiente al límite inferior $\mu-2\sigma$.

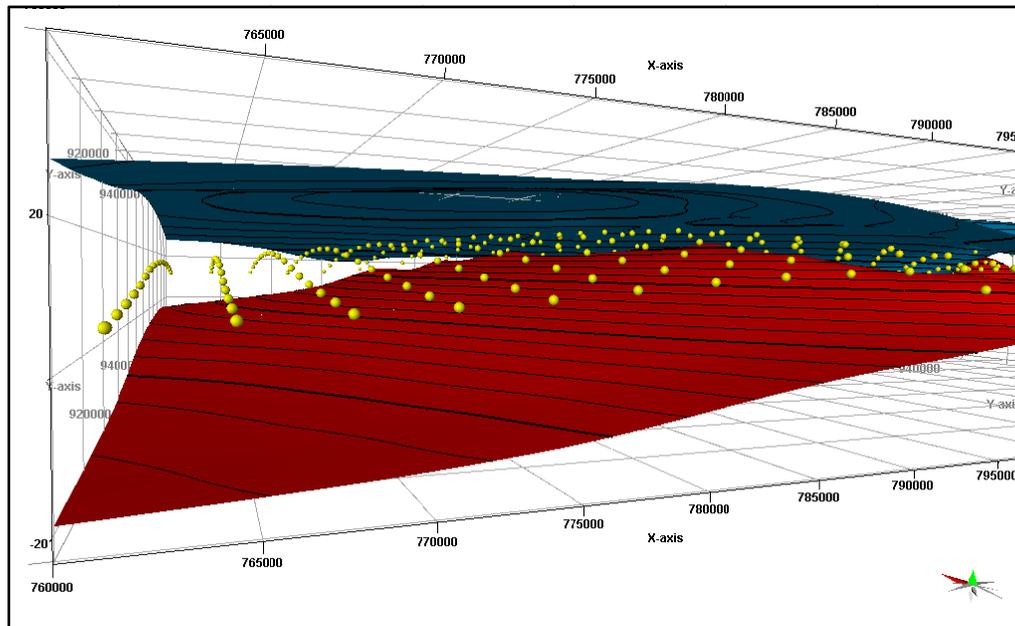


Figura 3.10. Vista de los datos de gravedad terrestre (puntos amarillos) contenidos dentro de las superficies correspondientes a los límites de incertidumbre.

La Figuras 3.9 y 3.10 muestran a partir de un ejemplo en Faja Petrolífera el método de los límites de incertidumbre. La primera corresponde a la vista general de las dos superficies calculadas, la azul (límite superior) y la roja (límite inferior) asociadas a los intervalos $\mu+2\sigma$ y $\mu-2\sigma$, respectivamente. Donde μ es la media y σ es la desviación estándar de la variable estimada, en este caso, la anomalía de Bouguer terrestre.

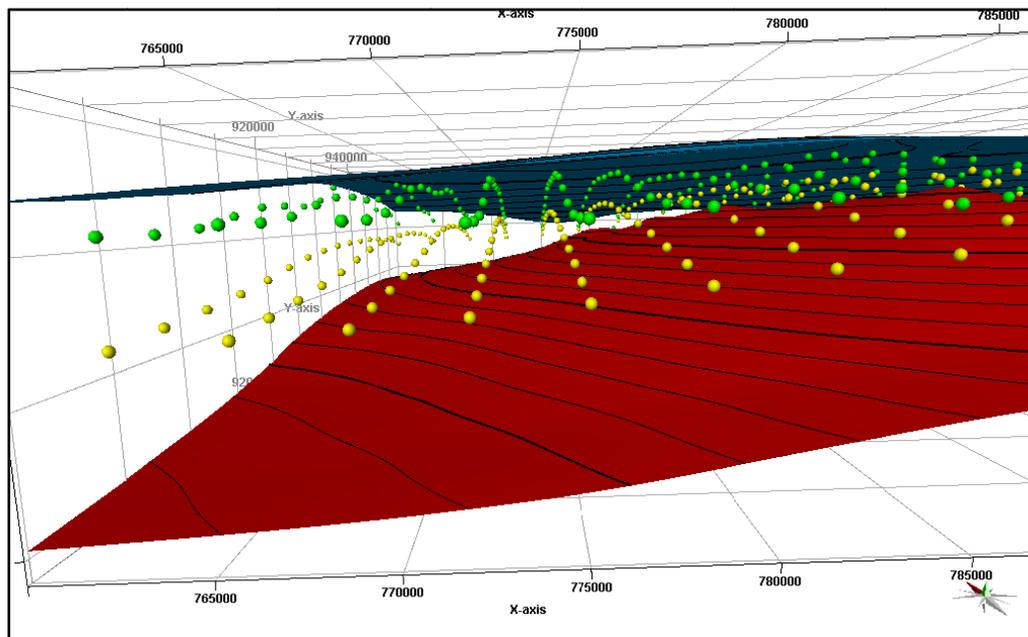


Figura 3.11. Datos de gravedad terrestre (puntos amarillos) y datos de gravedad satelital (puntos verdes) contenidos dentro de las superficies asociadas a los límites de incertidumbre. La distancia entre los datos terrestres y satelitales es menor que el intervalo de incertidumbre permitido, lo cual implica que la estimación realizada es satisfactoria y los puntos permanecen dentro de las dos superficies.

El propósito es determinar cuáles y cuántos de los puntos observados cumplen con los intervalos de confianza (al 95%) establecidos alrededor de los datos terrestres. Por ello, la Figura 3.11 muestra los puntos satelitales (puntos verdes) en conjunto con los datos terrestres (puntos amarillos) contenidos dentro de las superficies ya comentadas. Es posible que algunos de estos puntos excedan alguno de los límites de incertidumbre (por encima o por debajo), lo que en términos gráficos se traduce en que los puntos se salen de las superficies establecidas (Figura 3.12). Mientras más

cercanas estén las superficies entre sí, implica que la varianza asociada a la estimación puntual es más pequeña y por lo tanto la predicción es más exacta.

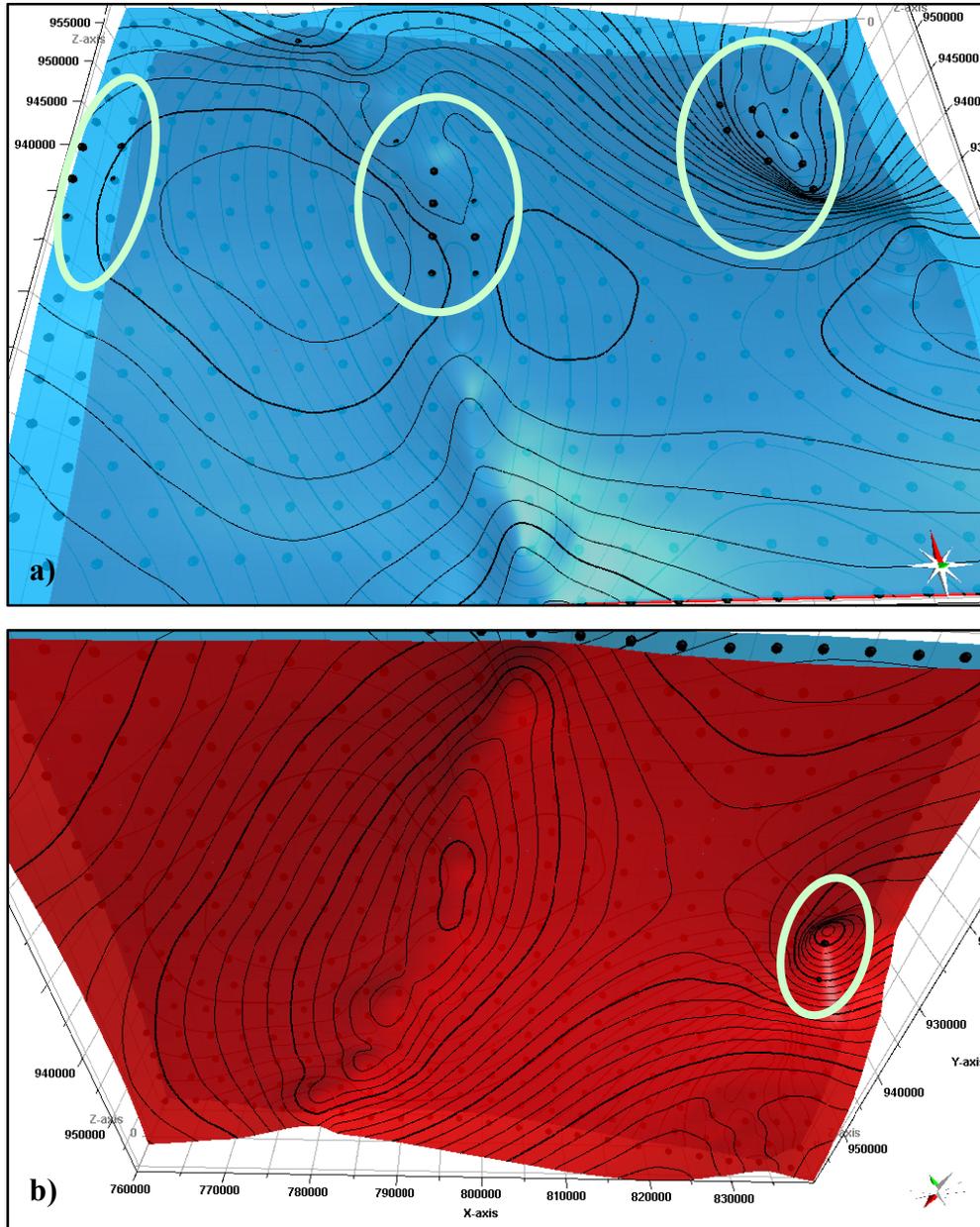


Figura 3.12. Datos de gravedad satelital (puntos negros) fuera de las superficies asociadas a los límites de incertidumbre. Los datos están fuera de rango porque la distancia entre los datos terrestres y satelitales excede el intervalo de incertidumbre permitido, lo cual implica que la estimación realizada no es robusta y los puntos se salen de las dos superficies. En círculos verdes: a) datos por encima del límite superior. b) datos por debajo del límite inferior.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 ZONA TIPO 1: FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

4.1.1. Resolución de los datos

Luego de aplicar la rutina de muestreo programada en *R Project*, se obtuvieron un total de 596 datos de satélite con al menos un punto equivalente en tierra.

4.1.2. Estadísticos básicos y modelos lineales

Se realizó la estadística descriptiva de los datos satelitales y terrestres (Tabla 4.1), a partir de la cual se obtuvo información sobre algunas características resaltantes en las variables. En primer lugar, los datos de anomalía de Bouguer satelitales y terrestres presentan valores análogos dentro de los intervalos considerados. También, aunque los valores de cotas terrestres muestran buena similitud en general, hay diferencias significativas en sus valores mínimos.

Tabla 4.1. Descriptivos básicos de las cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Cotas satelitales (m)	7.0	79.0	122.0	118.4	151.0	310.0	47.8
Cotas terrestres (m)	29.6	75.2	123.3	119.7	150.3	315.6	51.6
AB Satélite (mgal)	-55.9	-5.1	4.5	2.7	13.8	36.5	15.5
AB Terrestre (mgal)	-59.3	-9.7	1.2	-0.1	10.1	37.0	15.4

Se generaron además para cada variable el histograma de frecuencia y gráfico QQ para evaluar cualitativamente la normalidad de los datos de anomalía de Bouguer (Figura 4.1). En base a la inspección visual, se puede observar que ambos histogramas muestran distribuciones similares aparentemente normales y el gráfico QQ comprueba la normalidad de las variables, al presentar un buen ajuste a la recta

teórica normal. Solo para los valores extremos negativos, existe una desviación considerable de los datos respecto a la recta, lo cual es notable a su vez en los histogramas de frecuencia de ambas variables.

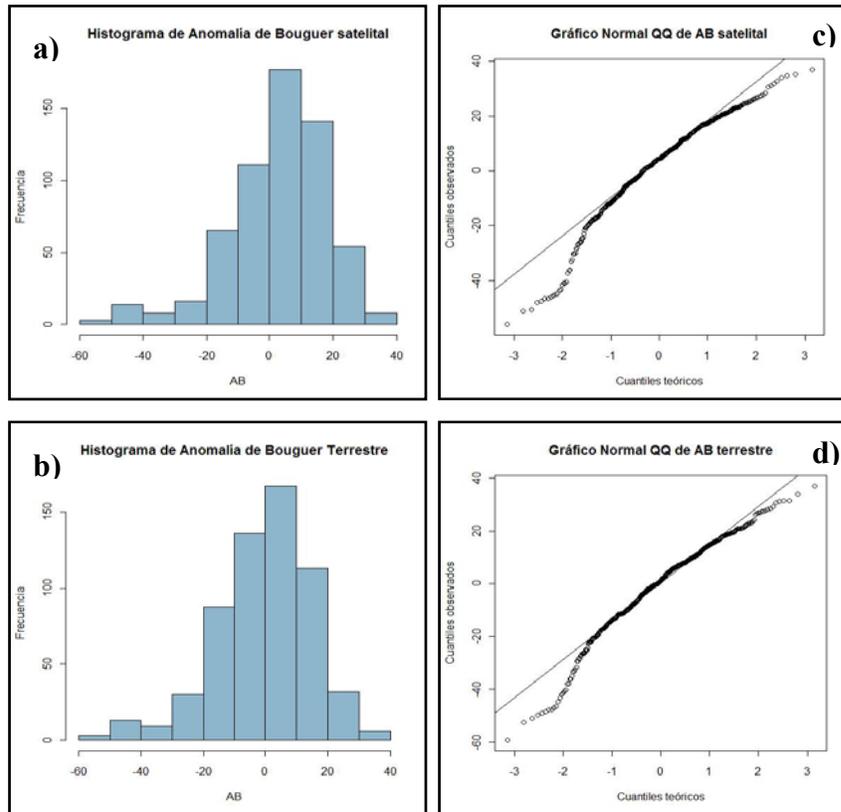


Figura 4.1. a) Histograma de frecuencia para AB satelital. b) Histograma de frecuencia para AB terrestre. c) Gráfico QQ para AB satelital. d) Gráfico QQ para AB terrestre. Nótese la similitud entre las distribuciones de las variables y el buen ajuste a las rectas normales teóricas.

Dada la similitud en la distribución de las variables, se realizó un gráfico de dispersión para determinar el grado de dependencia lineal. La Figura 4.2 muestra la relación positiva lineal que existe entre AB satelital y AB terrestre, la ecuación que la describe y el valor del coeficiente de ajuste, el cual al ser elevado implica que ambas variables se comportan espacialmente de forma análoga. Asimismo, el coeficiente de correlación obtenido es de 0.9397, indicando que AB satelital y AB terrestre están notablemente relacionadas.

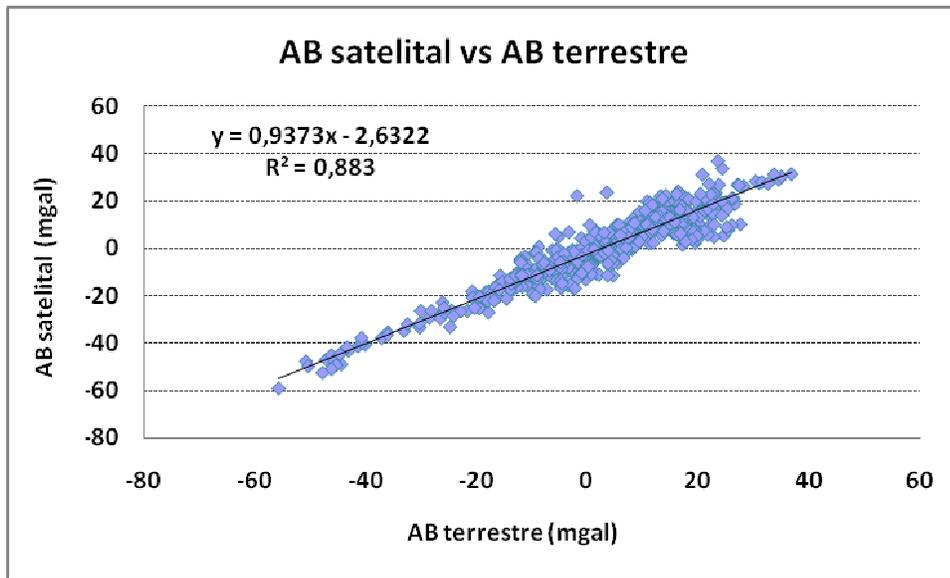


Figura 4.2. Gráfico de dispersión AB satelital contra AB terrestre.

Seguidamente, se realizaron los diagramas de cajas y bigotes para descartar la presencia de algún valor atípico. En la Figura 4.3 se muestran los diagramas para AB satelital y terrestre, donde para ambas variables se observan valores fuera del rango establecido. Sin embargo, es necesario partir de la premisa de que los datos de anomalía de tierra son correctos, dado que el objetivo principal es cuantificar los errores y diferencias entre los datos de tierra y los de satélite para a partir este análisis validar estos últimos. De forma general, entonces, se desea conservar la totalidad de los datos de anomalía de Bouguer tanto satelitales como de tierra para poder cuantificar y esclarecer las fuentes de dichas diferencias y errores.

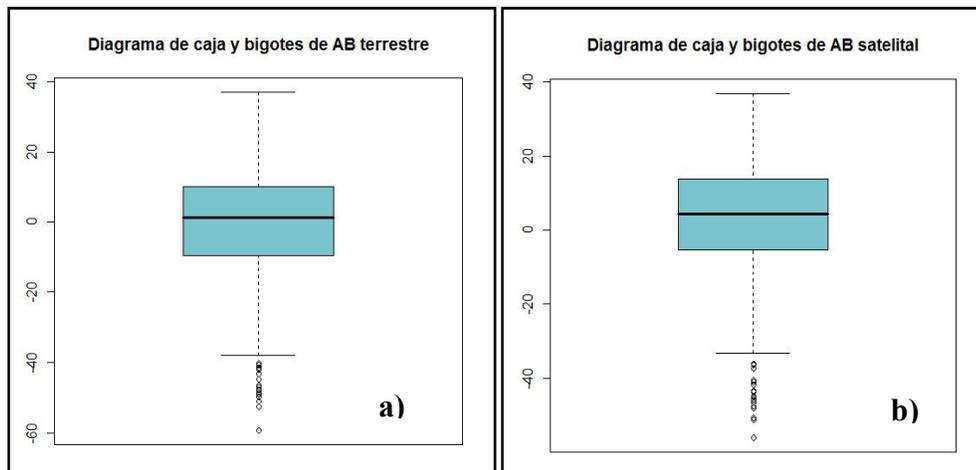


Figura 4.3. a) Diagrama de caja y bigote para AB terrestre. b) Diagrama de caja y bigotes para AB satelital.

Para observar tendencias espaciales preliminares, se graficaron los mapas de percentiles para AB satelital y terrestre (Figura 4.4). Los cuartiles provienen de la tabla 1. Los valores van del 1 al 4 y cada uno representa su cuartil correspondiente, es decir, los datos ubicados en los dos primeros percentiles son los valores medios a bajos (tonos azules), y los ubicados del 3 al 4 son los valores medios a altos (amarillo y rojo). Los mapas de percentiles muestran que la tendencia es la aglomeración de datos pertenecientes a un mismo percentil en zonas específicas. La relación entre la distribución espacial de los datos y la distribución de probabilidades de AB en ambos casos es similar. Asimismo, los círculos negros sobre el mapa facilitan la observación de las zonas donde existen diferencias considerables entre los dos mapas. El principal objetivo de generar estos mapas es verificar, en primera instancia de forma espacial que efectivamente existen diferencias entre ambos datos.

Figura 4.4. Mapa de percentiles de AB satelital y terrestre. Donde (1) es el primer cuartil, (2) es el segundo cuartil, (3) es el tercer cuartil y (4) es el cuarto cuartil.

A continuación se requiere cuantificar y caracterizar las diferencias entre los conjuntos de datos, por lo tanto, se calculan sus diferencias restando el valor de AB

satelital a su valor de AB equivalente en tierra, y de la misma forma para las cotas y además, se toman en cuenta los valores absolutos de estas diferencias.

Si los errores que causan las diferencias entre los datos de anomalía de Bouguer y cota (satelital y terrestre) fuesen casuales o aleatorios, los valores deberían ser normales centrados en cero. Para evaluar esto se hace uso de los descriptivos básicos, que son mostrados a continuación en la tabla 4.2:

Tabla 4.2. Descriptivos básicos de las diferencias de cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Diferencia AB	-24.120	-0.3841	2.822	2.8020	5.5770	19.33	5.219542
Abs (Dif. AB)	0.0224	1.6880	3.8180	4.6660	6.2900	24.12	3.848136
Diferencia Cota	-77.870	-14.6023	-0.6216	-1.3399	8.3700	165.94	27.69021
Abs (Dif. Cota)	0.0000	4.1420	10.720	17.520	22.950	165.90	20.79921

Los aspectos más importantes presentados aquí son que las diferencias de cota son de mayor magnitud que las diferencias de AB, la desviación estándar promedio de las diferencias de AB es pequeña (en comparación a la de cota) y ambas tienen medias cercanas a cero.

Luego, se realizaron el histograma de frecuencia y el gráfico QQ para las diferencias de cota y AB, para evaluar el tipo de distribución presente en estos datos.

Las diferencias de anomalía de Bouguer (Figura 4.5) muestran un ajuste aproximadamente normal. Sin embargo, se presentan algunos valores extremos negativos y positivos, los cuales además pueden verse en el gráfico QQ distorsionando el ajuste con la distribución normal teórica.

Para las diferencias de cotas, el histograma no se ajusta a la distribución normal como para el caso anterior. Una serie de valores extremos positivos principalmente y algunos negativos se encuentran muy por fuera de los límites teóricos de la distribución normal.

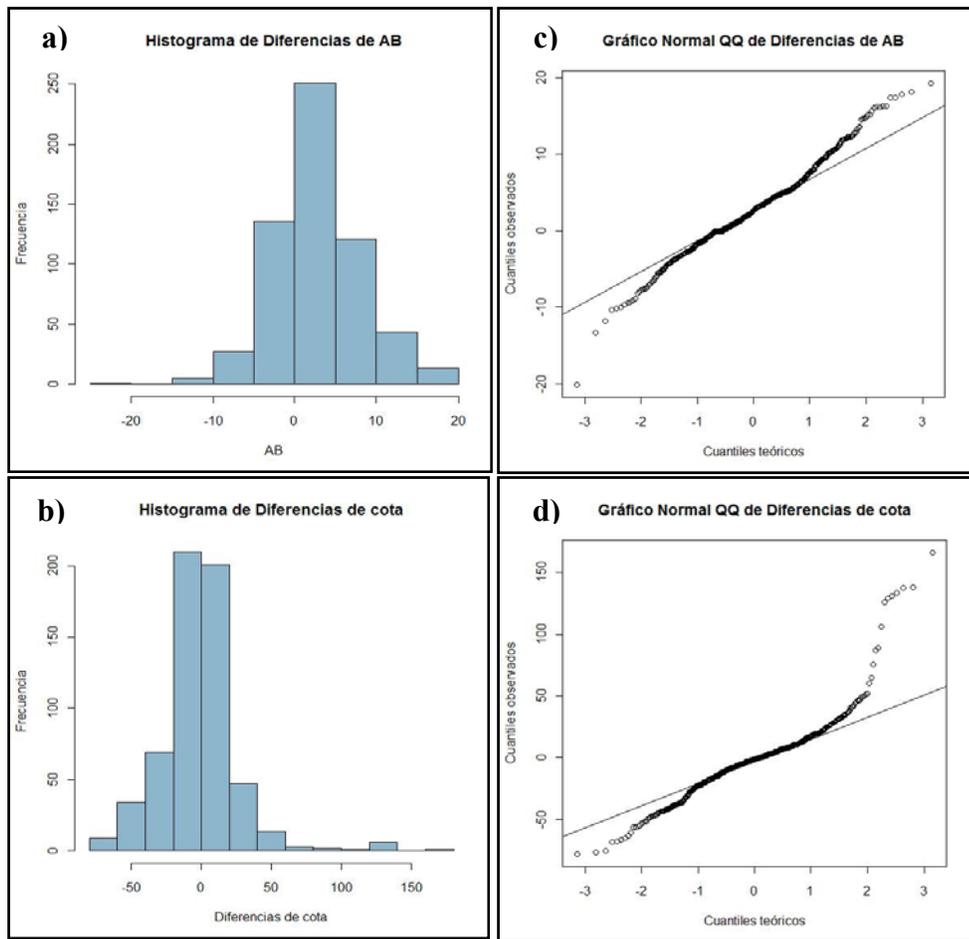


Figura 4.5. a) Histograma de frecuencia para diferencias de AB. b) Histograma de frecuencia para diferencias de cota. c) Gráfico QQ para diferencias de AB. d) Gráfico QQ para diferencias de cota. Nótese que las diferencias de AB presentan una distribución aparentemente normal y un buen ajuste a las rectas normal teórica. Para las cotas hay valores extremos positivos que sesgan la distribución.

Siguiendo con la metodología para caracterizar las diferencias de cota y AB, se realizó un gráfico de dispersión de diferencias de cota contra diferencia de AB para evaluar la tendencia general de los datos en conjunto. El gráfico de dispersión para las diferencias no mostró tendencias claras, por lo que se decidió verificar la existencia de alguna tendencia dependiente de otras variables, en este caso de la longitud y latitud. Se calculó asimismo el coeficiente de correlación para las diferencias y se obtuvo una correlación negativa de 0.38, lo cual a priori indica que si se produce una sobreestimación en el valor de la cota, habrá entonces una subestimación de la anomalía de Bouguer.

Posteriormente, se plantearon dos modelos lineales en función de la latitud y longitud, uno para las diferencias de cota y otro para diferencias de anomalía de Bouguer. Para ambos modelos, ni la longitud ni el intercepto son significativos; es decir, las diferencias de cota y anomalía dependen solo de la latitud. Igualmente, el coeficiente de ajuste R^2 es muy pequeño porque, como es de esperarse, aunque los errores tengan una tendencia significativa decreciente contra la latitud, esta tendencia sólo explica una pequeña parte de la variabilidad de los errores.

Dado que la longitud no presenta significancia en el modelo previo, entonces se generaron dos nuevos modelos, solamente con la latitud, cuyos resultados se muestran en las tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Resumen de los valores del modelo lineal 2 planteado para diferencias de cota.

R^2	0.05754	Estimado	Desv.Est.Error	valor t	Pr(> t)
Coeficientes	(Intercepto)	135.595	22.746	5.961	4.29e-09
	Lat	-15.898	2.638	-6.027	2.93e-09
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-78.864	-13.036	1.404	11.193	149.578

Tabla 4.4. Resumen de los valores del modelo lineal 2 planteado para diferencias de AB.

R^2	0.05064	Estimado	Desv.Est.Error	valor t	Pr(> t)
Coeficientes	(Intercepto)	28.2125	4.5155	6.248	7.93e-10
	Lat	-2.9500	0.5236	-5.634	2.72e-08
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-27.7502	-2.8539	0.2971	3.0329	15.5056

Para los dos casos, la latitud y el intercepto tienen una alta significancia dentro del modelo. Los residuales tienen valores medios muy cercanos a cero y el coeficiente R^2 disminuyó un poco su valor.

Las diferencias de cota tienen un componente sistemático producido por alguna fuente de error que depende de la localización y disminuye con incrementos en la latitud. Para comprobar esta variabilidad, se muestra el mapa topográfico de la región 1 obtenido desde la página web de The CGIAR-CSI Consortium for Spatial

Information (Figura 4.6), donde al sureste y centroeste se pueden observar gradientes puntuales fuertes, los cuales coinciden las ubicaciones donde existen diferencias de cota mayores a 50 m (círculos amarillos). Otro aspecto relevante es que en zonas de topografía variable al norte, existe sobreestimación de la cota terrestre y por el contrario, en zonas estables hacia el sur, se presenta subestimación de la cota.

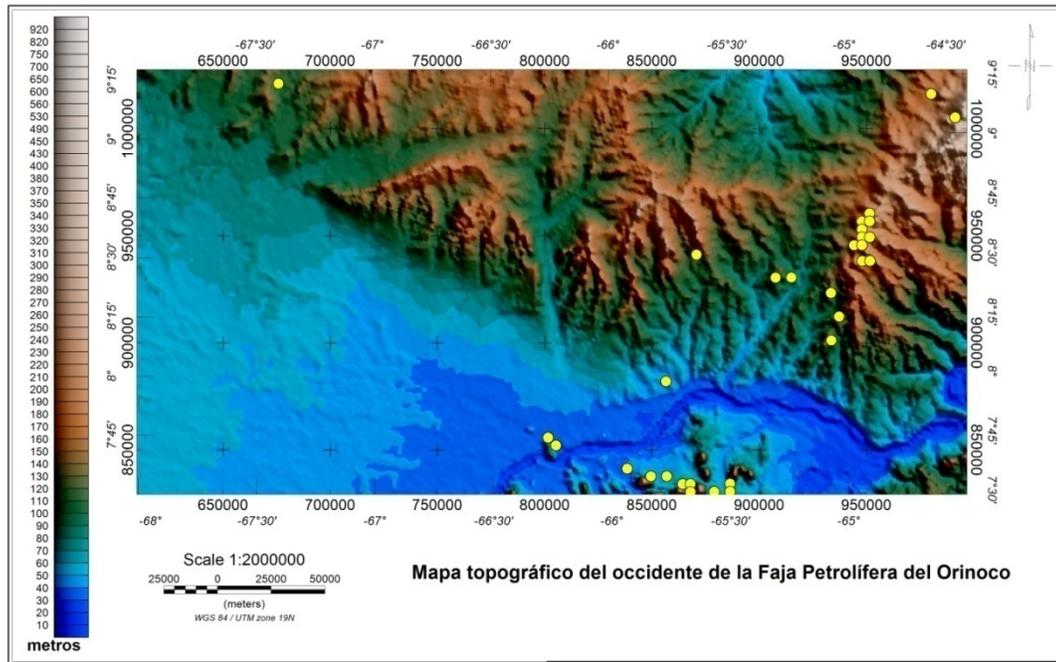


Figura 4.6. Mapa topográfico de la zona en estudio. Los círculos amarillos son estaciones con diferencias de cota mayores a 50 metros.

Por otro lado, el modelo lineal apunta a que también las diferencias de AB tienen una variabilidad consecuente en dirección norte-sur. La primera causa probable está relacionada con las diferencias de cotas que se reportan a lo largo de toda el área y que también presentan una variación con la latitud. De igual forma, el factor geodésico y la implementación de la fórmula internacional de gravedad para el cálculo de la gravedad teórica, podrían estar influyendo en las diferencias; sin embargo, ambos conjuntos de datos fueron corregidos con la fórmula de 1967. Entonces, se estableció como última suposición, la variación sistemática de los

valores de AB con la latitud se deba al efecto de arrastre del satélite durante el recorrido norte-sur por la órbita correspondiente.

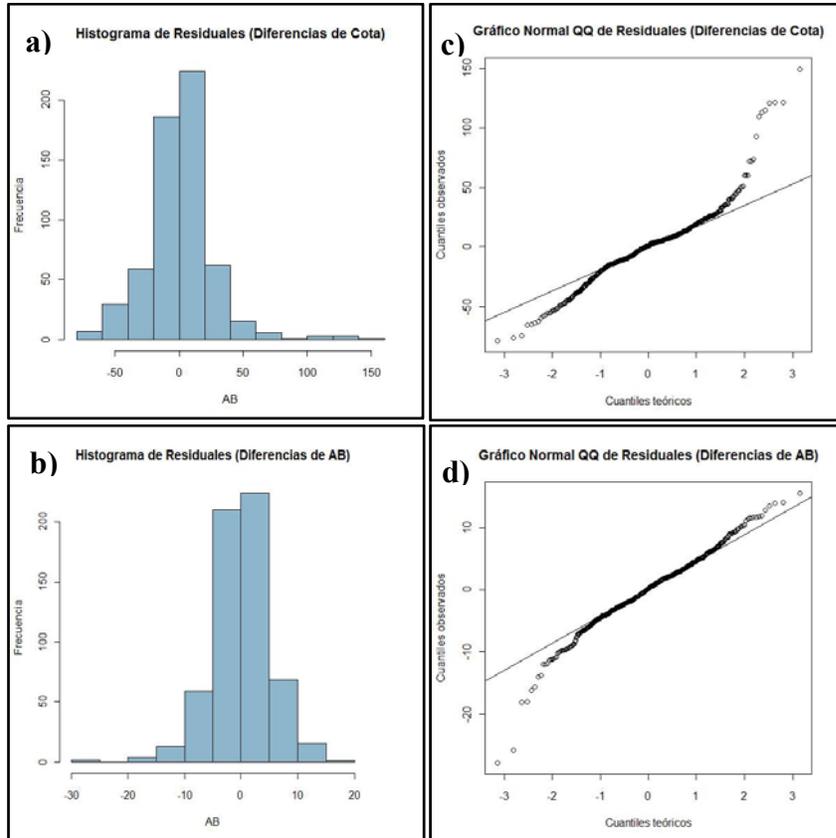


Figura 4.7. a) Histograma de frecuencia para residuales de diferencias de cota. b) Histograma de frecuencia para residuales de diferencias de AB. c) Gráfico QQ para residuales de diferencias de cota. d) Gráfico QQ para residuales de diferencias de AB. Nótese que presentan una distribución aparentemente normal y un buen ajuste a las rectas normal teórica. Para las cotas hay valores extremos positivos que sesgan la distribución.

Una vez explicadas las tendencias, se retiran de los datos y se obtienen los residuales, los cuales, efectivamente, se distribuyen normalmente con sus valores centrados en cero como lo muestran los histogramas y gráficos QQ de la Figura 4.7, cumpliendo con el principio de estacionariedad. Al remover las tendencias el coeficiente de correlación entre los residuales aumenta.

En resumen, los resultados anteriores indican que parte de las diferencias entre los datos de tierra y de satélite se deben a una tendencia sistemática norte-sur en la estimación de la topografía.

4.1.3 Geoestadística: Kriging

El principal objetivo de la geoestadística es la predicción de los valores no observados, uniformemente distribuidos y con mayor densidad que las observaciones de la muestra. En este contexto, la interpolación es utilizada para estimar estos valores no observados, con la finalidad de obtener mapas con una distribución más continua de la propiedad de interés, dado que con este proceso se estima el valor de los puntos no observados como una combinación lineal de los valores conocidos.

Existen diversos métodos de interpolación, pero se empleará Kriging en este caso, ya que es mucho más completo porque contiene un modelo global de la estructura espacial de los datos. El proceso de resolución de las ecuaciones de Kriging está basado en el modelo de variabilidad espacial contenido en el variograma, por lo tanto, la solución será en el mejor de los casos tan buena como lo sea el modelo de variabilidad espacial.

Los datos gravimétricos terrestres y satelitales fueron sometidos al análisis geoestadístico usando el software de programación estadística R (R Development Core Team, 2009) y los paquetes de análisis geoestadístico SP (Pebesma y Bivand, 2005) y gstat (Pebesma, 2004).

4.1.3.1 Variografía

Para realizar la variografía correspondiente previa al Kriging, se emplearon los datos de tierra y satelitales. Para ello, se generaron los mapas de variograma para evaluar tendencias preferenciales de continuidad (Figura 4.8). Los valores empleados para el *cutoff* o distancia máxima de alcance del variograma y *width* o ancho de las ventanas de búsqueda de puntos, fueron de 1 y 0.08 respectivamente. Se debe recordar que las

unidades de distancia son grados, ya que así están expresadas las coordenadas de ubicación. Igualmente, se observó que la tendencia de mayor continuidad para los datos de tierra está a 330° (grados a partir del norte) y la de menor continuidad justo a 90° , es decir a 240° . Para los datos satelitales la dirección de máxima y mínima variabilidad corresponde a los 220° y 310° , respectivamente.

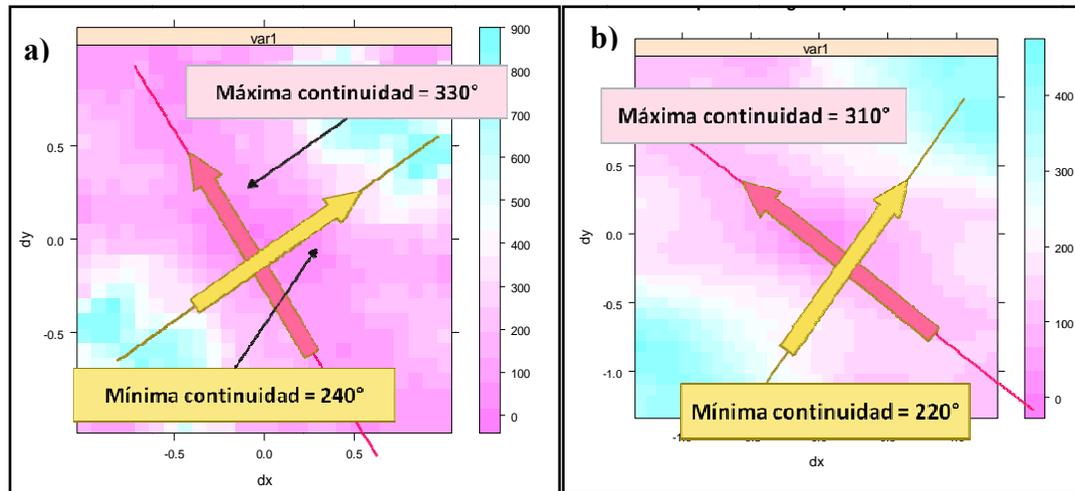


Figura 4.8. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital. Se presentan las direcciones de máxima y mínima continuidad correspondientes, las cuales son similares para ambos conjuntos de datos.

Posteriormente, se realizaron los variogramas experimentales a partir de las tendencias observadas en el mapa previo. La distancia máxima de alcance para este caso fue de 1.3, el ancho de la ventana de búsqueda igual a 0.06 y las direcciones de búsqueda para el variograma terrestre fueron 330° y 240° . En el caso satelital, se emplearon las mismas distancias de búsqueda y ancho de ventana, con direcciones preferenciales iguales a 220° para menor continuidad y 310° para mayor continuidad.

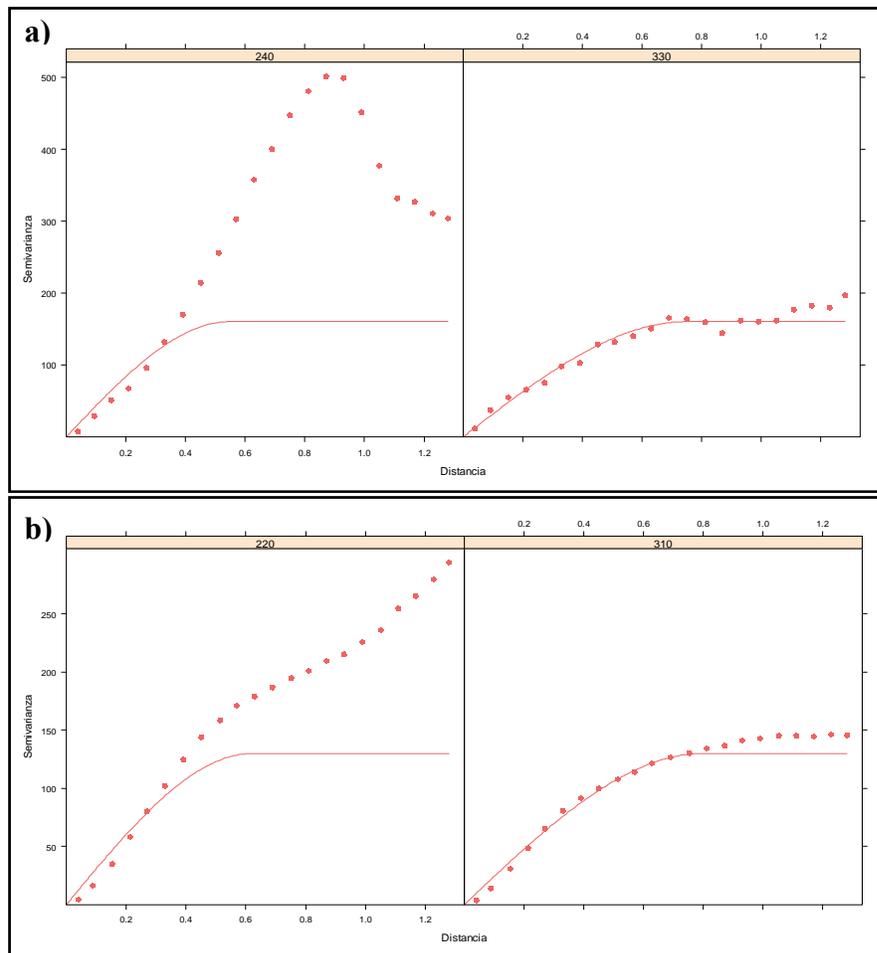


Figura 4.9. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital. Se presentan las direcciones de máxima y mínima continuidad correspondientes.

El paso siguiente fue ajustar el variograma teórico al experimental (Figura 4.9). El modelo final utilizado para los datos terrestres fue un modelo esférico, cuyos parámetros de ajuste fueron: $sill = 160$, $nugget = 0$, $rango = 0.75$ y relación $RangoMenor/RangoMayor$ igual a 0.7 (elipse de anisotropía). Por otro lado, los datos satelitales se ajustaron con un modelo esférico, con $sill$ de 130, $nugget$ cero, $rango$ mayor igual a 0.8 y relación $RangoMenor/RangoMayor$ igual a 0.78.

4.1.3.2 Estimación por Kriging

Una vez obtenida la variografía, se procedió a la estimación por Kriging para AB terrestre. Se empleó como mallado de destino la misma distribución de localizaciones satelitales, para hacer las estimaciones sobre cada punto del modelo combinado y poder realizar punto a punto la comparación posterior.

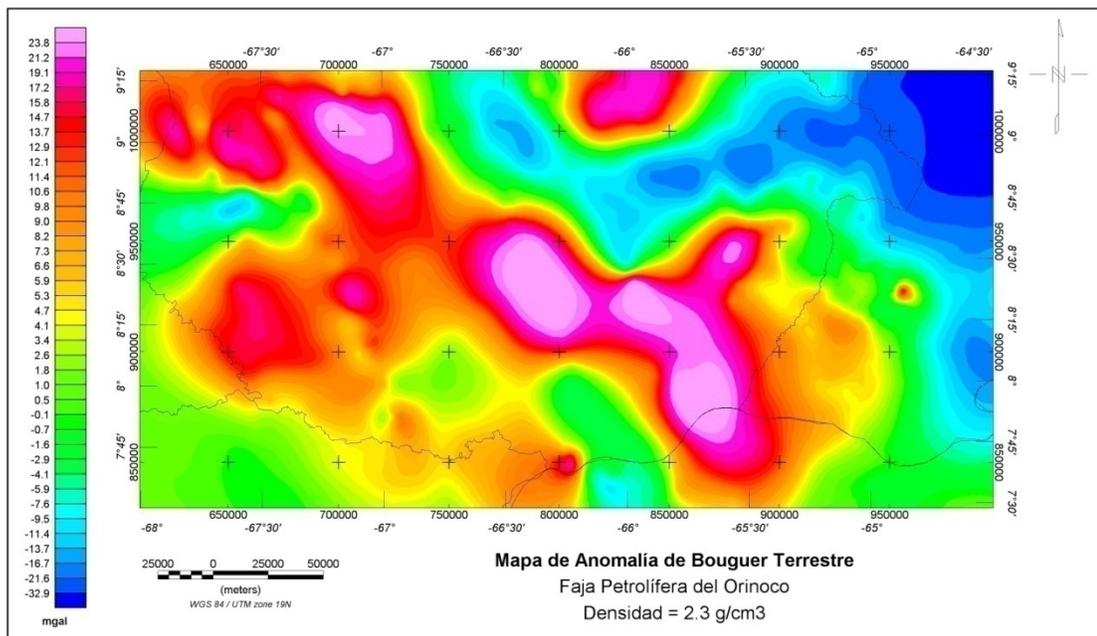


Figura 4.10. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging, a partir de las localizaciones satelitales. Se observa a priori una tendencia regional marcada en dirección NO-SE.

La Figura 4.10 corresponde al mapa final, producto de la predicción hecha por el Kriging para AB terrestre. Es notable ver que presenta en general suaves tendencias y muy poca presencia de ruido, dado que las ecuaciones de Kriging minimizan la varianza de las estimaciones.

Por otro lado, la Figura 4.11 muestra el mapa de varianzas asociado a dichas estimaciones, al cual se le han añadido las localizaciones de los datos (puntos negros). Los menores valores de varianza se concentran alrededor de los sitios donde se ubican los datos y los mayores valores en aquellas zonas donde hay ausencia de ellos.

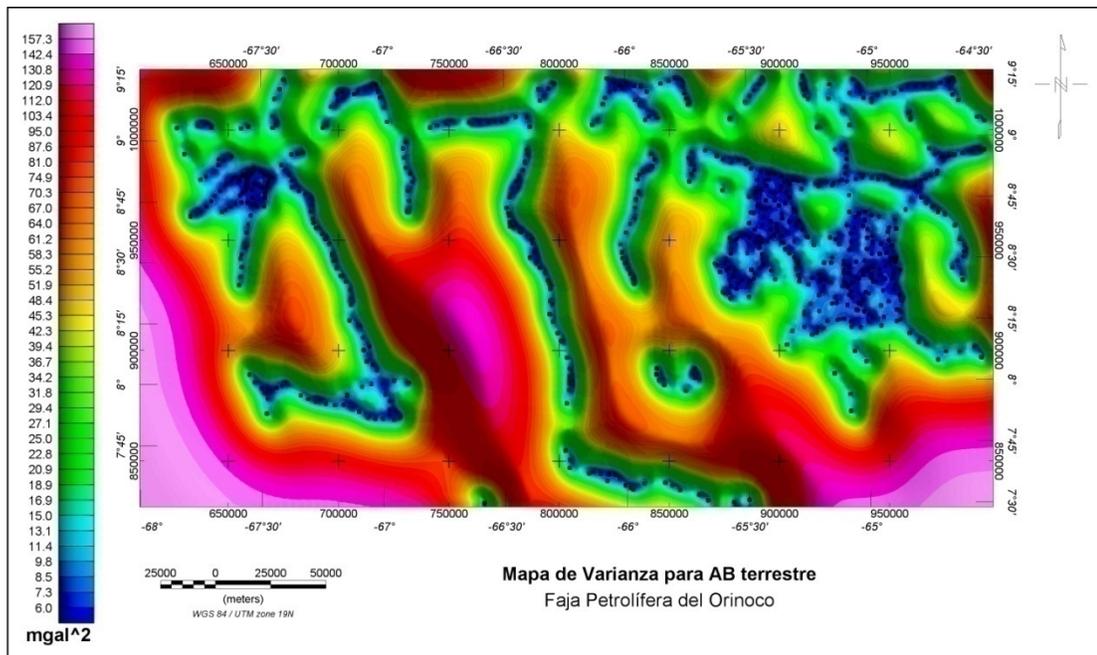


Figura 4.11. Mapa de Varianza estimado a partir de Kriging para AB terrestre. Los mayores valores de varianza se presentan en las zonas con ausencia de datos, mientras que en las cercanías de las estaciones la varianza es mínima.

Se generó además el mapa de AB satelital (Figura 4.12), el cual muestra la influencia de un efecto regional muy marcado que manifiesta amplios gradientes hacia la región central del mapa y en dirección E-O, hecho que contrasta con el comportamiento de las isoanómalas en el mapa AB terrestre generado a partir del Kriging, donde la dirección preferencial es NO-SE.

De igual manera, la Figura 4.13 correspondiente al mapa de profundidad al tope de basamento de la zona (Rodríguez, 1977), guarda una alta correspondencia con la respuesta gravimétrica observada en el mapa de anomalías de Bouguer satelital.

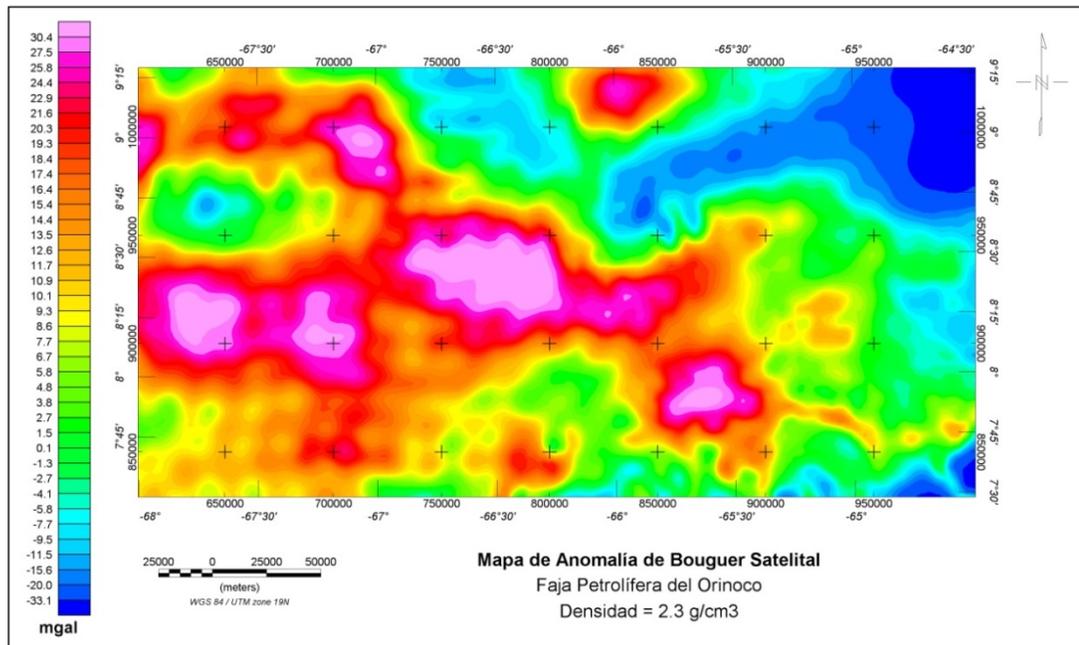


Figura 4.12. Mapa de AB satelital estimado a partir de Kriging. Se muestra una tendencia regional marcada en dirección E-O.

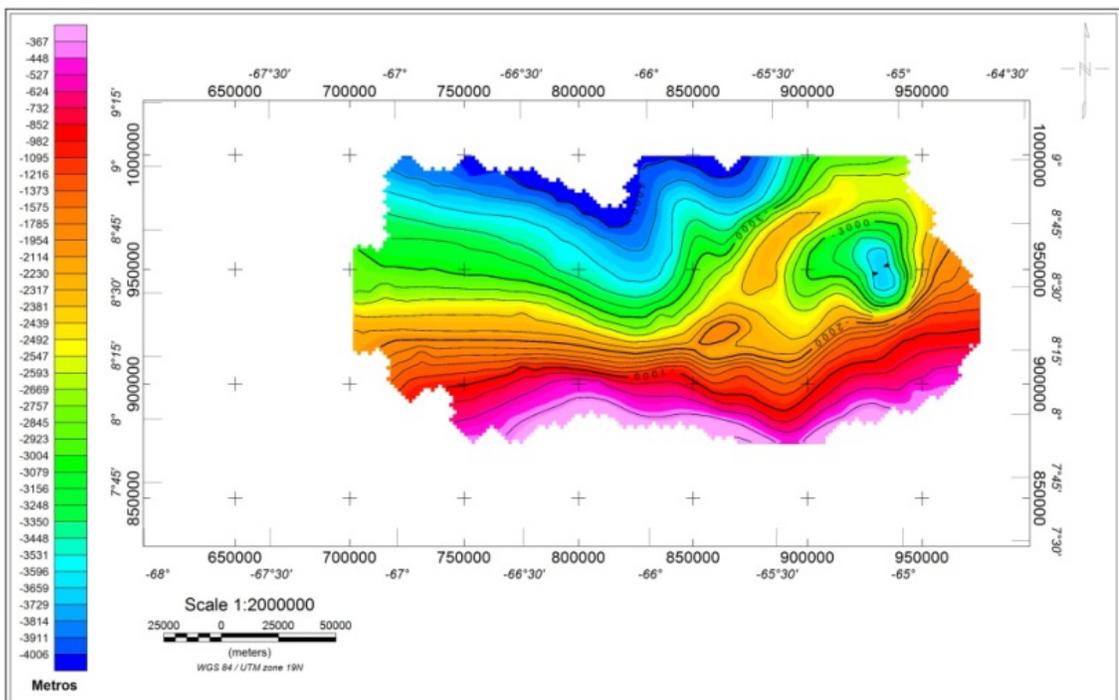


Figura 4.13. Mapa de profundidad al tope de basamento estimado a partir de Mínima Curvatura.

La Figura 4.14 es el mapa AB terrestre a partir de Kriging con sus respectivas localizaciones. Aparentemente, el enmascaramiento del efecto regional visto en las tendencias del mapa de AB terrestre, puede estar relacionado con la ausencia de datos en algunas zonas.

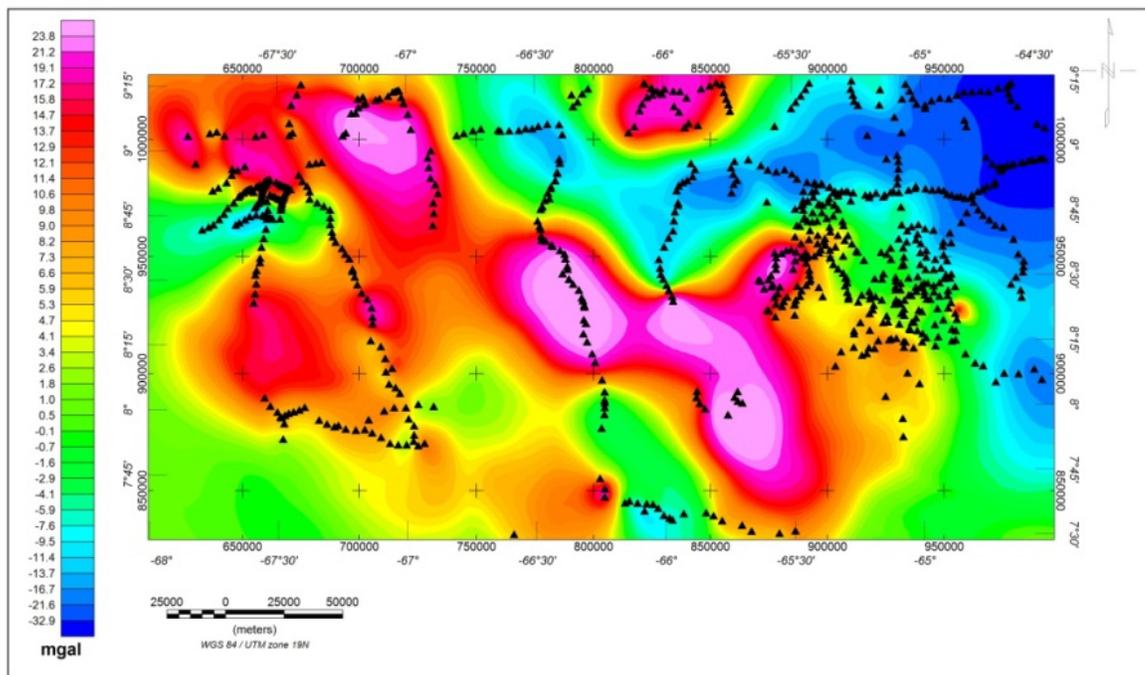


Figura 4.14. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging. Los puntos negros son las localizaciones de las estaciones terrestres.

4.1.3.3 Intervalos de confianza

Como los datos empleados se distribuyen normalmente, es fácil estimar los intervalos de confianza de una predicción para cada punto. A partir de los valores puntuales de varianza generados por el Kriging, se calcularon las superficies asociadas a los intervalos de confianza alrededor de los valores estimados para los datos de Tierra (incertidumbre permitida), usando la fórmula $\mu \pm n\sigma$, para un intervalo del 95%. La finalidad de esta prueba era comprobar que las mediciones de AB satelital se encontraban dentro de dicho intervalo permitido.

Los cálculos indican que con un 90% de probabilidad los datos de satélite cumplen con esa condición. Luego, el 10% de los datos que están fuera del intervalo de confianza establecido se graficaron para conocer su ubicación geográfica y estimar en lo posible el origen de estas diferencias puntuales, aunque ya a lo largo de todo el estudio se ha establecido que una de las principales causas de las diferencias entre los datos de Anomalia de Bouguer satelitales y terrestres está asociada con las variaciones en los valores de topografía. La Figura 4.15 muestra los datos fuera del intervalo de confianza (triángulos amarillos) y ubicación de los puntos con diferencias de cota mayores a 20m (cuadros verdes) sobre el mapa de Varianza para AB terrestre.

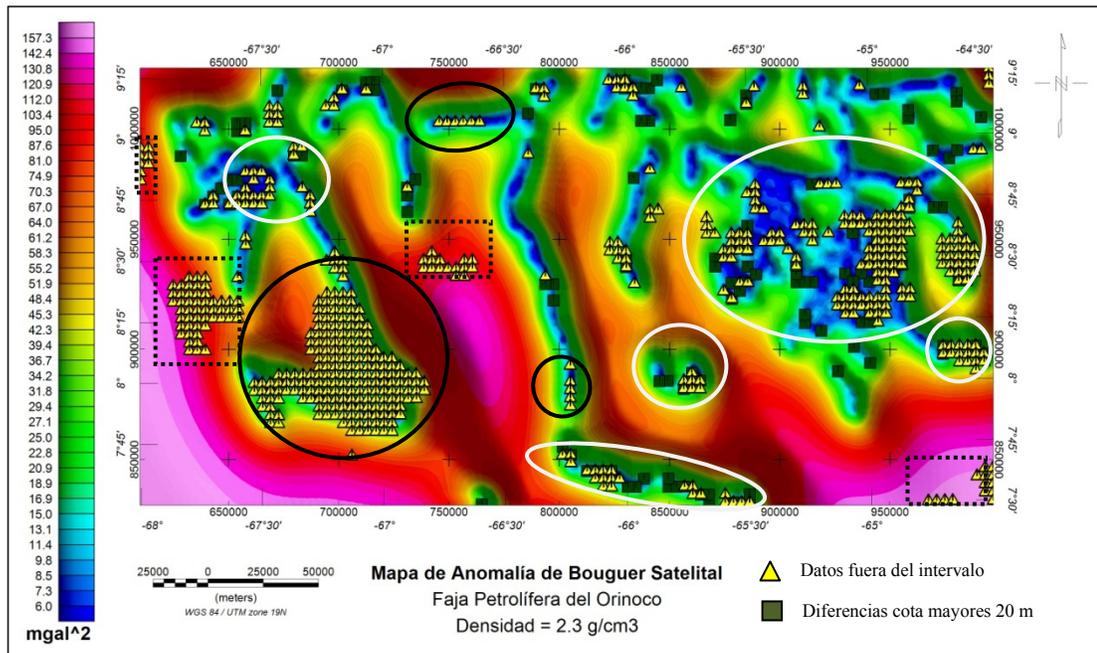


Figura 4.15. Ubicación de los puntos con diferencias de cota mayores a 20 m (cuadros verdes) y datos fuera del intervalo de confianza (triángulos amarillos) sobre el mapa de Varianza para AB terrestre.

En el mapa tres situaciones completamente distintas pueden observarse, para todos los casos existe la presencia de datos satelitales fuera de rango:

La primera, señalada por los círculos blancos, corresponde con aquellas zonas donde hay datos de tierra y diferencias de cota importantes. Entonces, las diferencias

encontradas entre los valores de anomalía satelitales y terrestres estimados están asociadas con estas diferencias de cota superiores a los 20 metros.

La segunda, enmarcada en cuadrados punteados, representa regiones donde no existían datos de tierra originalmente y que fueron estimados a partir del kriging pero con una varianza muy alta, por encima de los 120 mgal². En este caso los datos de satélite son los datos que deberían considerarse como robustos, dado que se encuentran a lo largo de toda el área.

Por último, los círculos negros son áreas que contienen datos de tierra y donde las diferencias de cota son inferiores a 20 metros. Se pueden ver tres zonas a lo largo de todo el mapa, siendo la más importante la que se ubica al suroeste del mapa, y cuyo levantamiento coincide con el realizado por la UCV. La posible causa para este comportamiento puede estar relacionada con el equipo manejado durante la adquisición. Sin embargo, no se dispone de información suficiente sobre el instrumental empleado en estos levantamientos para cuantificar errores asociados a dicha causa.

Finalmente, luego de realizar la estimación por Kriging de la anomalía de Bouguer terrestre, generar las superficies asociadas a los intervalos de confianza alrededor de los valores estimados, se obtuvo que para un 90% de los casos los datos de anomalía de Bouguer satelitales se encuentran dentro de los intervalos de incertidumbre permitidos y el 10% restante puede ser explicado bajo ciertas suposiciones. Esto implica que los datos satelitales pueden ser validados como datos equivalentes a los de adquisición terrestre.

4.2. ZONA TIPO 2: CORDILLERA DE LA COSTA

4.2.1. Resolución de los datos

Al igual que en el apartado de Faja Petrolífera, los datos de anomalía de Bouguer satelital y terrestre de Cordillera de la Costa tienen resoluciones distintas. Por ello, se

realizó nuevamente el muestreo de los datos para llevar todo a una resolución única, empleando la misma rutina programada. Se obtuvieron entonces un total de 330 datos del modelo combinado con datos satélite con al menos un punto equivalente en tierra.

4.2.2. Estadísticos básicos y modelos lineales

La tabla 4.5 contiene los descriptivos básicos de las variables en estudio. Es posible observar que dentro de cada intervalo los datos de anomalía de Bouguer satelitales y terrestres son semejantes y los valores de cotas manifiestan diferencias significativas en todos sus valores.

Tabla 4.5. Descriptivos básicos de las cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Cota satelitales (m)	-122.0	103.5	248.5	308.4	376.0	1433.0	302.7
Cotas terrestres (m)	-64.8	87.5	226.0	287.0	329.9	1576.0	290.4
AB Satélite (mgal)	-52.3	-24.5	-11.2	-7.5	4.2	65.9	23.1
AB Terrestre (mgal)	-55.5	-24.7	-11.1	-8.1	2.5	68.8	21.8

La Figura 4.16 es un resumen gráfico de las variables AB satelital y AB terrestre, donde se aprecia la semejanza en las distribuciones de los histogramas correspondientes a cada variable. En términos generales, se observa un buen ajuste de los datos a las rectas teóricas de normalidad y algunos valores fuera de rango en los diagramas de caja y bigote.

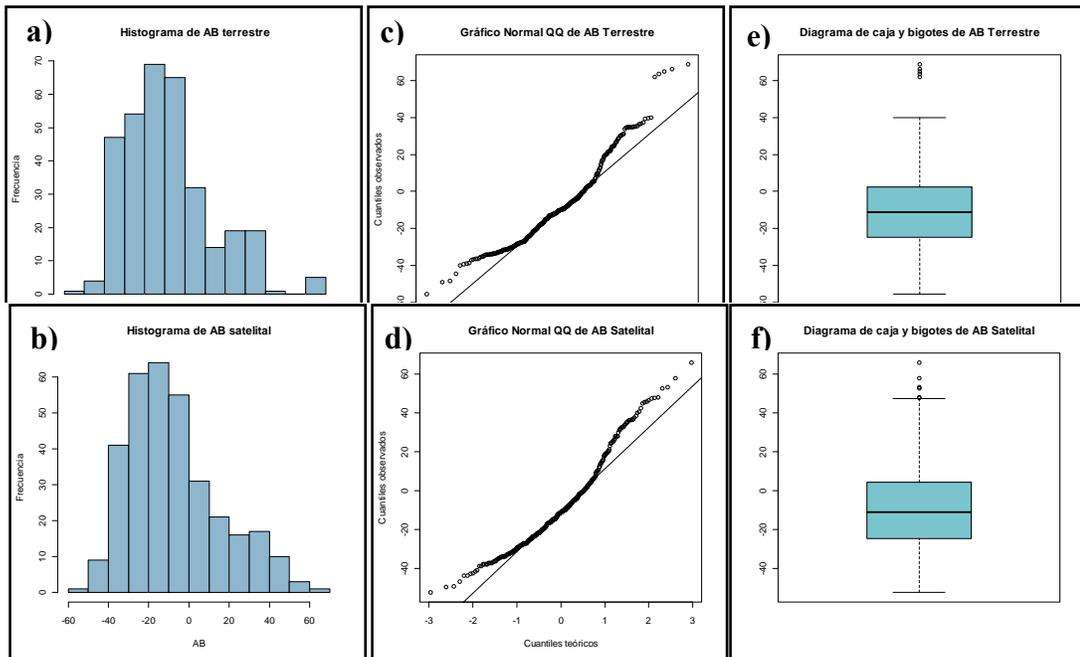


Figura 4.16. a) Histograma de frecuencia de AB terrestre. b) Histograma de frecuencia de AB satelital. c) Gráfico QQ para AB terrestre. d) Gráfico QQ para AB satelital. e) Diagramas de caja y bigote para AB terrestre. f) Diagramas de caja y bigote para AB satelital. Nótese la semejanza entre las distribuciones de ambos conjuntos de datos y un buen ajuste a la recta QQ. Algunos valores extremos positivos fuera del rango de la distribución par ambas variables.

La dependencia lineal entre AB satelital y AB terrestre puede verse en la Figura 4.17, claramente existe una tendencia lineal positiva que describe adecuadamente a las dos variables, cuyo valor de ajuste y la ecuación se presentan también en el gráfico.

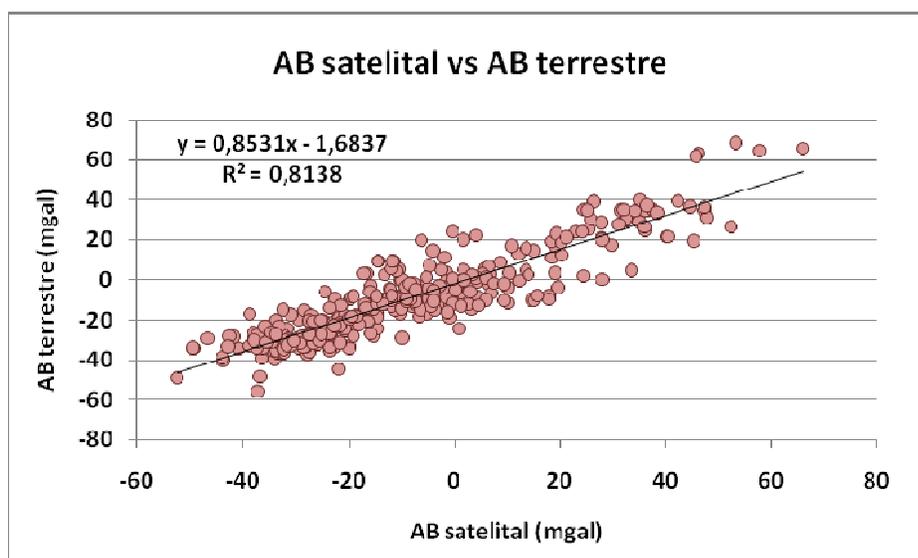


Figura 4.17. Gráfico de dispersión AB satelital contra AB terrestre. El modelo presenta un alto coeficiente de ajuste y señala una dependencia lineal positiva entre las variables.

De igual forma, la tabla 4.6 es un resumen numérico detallado de dicho modelo, donde se observa que los residuales asociados son simétricos y con media cercana a cero, expresando de esta forma indicios de normalidad. Se calculó adicionalmente el coeficiente de correlación entre AB satelital y AB terrestre, dando un valor de 0.90, lo que implica que ambas variables están altamente relacionadas.

Tabla 4.6. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB satelital y terrestre.

R^2	0.8138	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	-1.684	0.5457	-3.086	0.002
	ABSat	0.853	0.0225	37.863	2.00E-16
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-24.123	-5.333	0.157	4.944	26.877

Con la finalidad de evaluar alguna tendencia espacial de los datos de anomalía, se plantearon los modelos lineales AB satelital y AB terrestre en función de sus coordenadas geográficas. Las tablas 4.7 y 4.8 muestran los resultados numéricos, los cuales indican que tanto la longitud como la latitud tienen una alta significancia

dentro de los modelos. Los residuales de dichos modelos, se muestran en un resumen en cada tabla y gráficamente en la Figura 4.18.

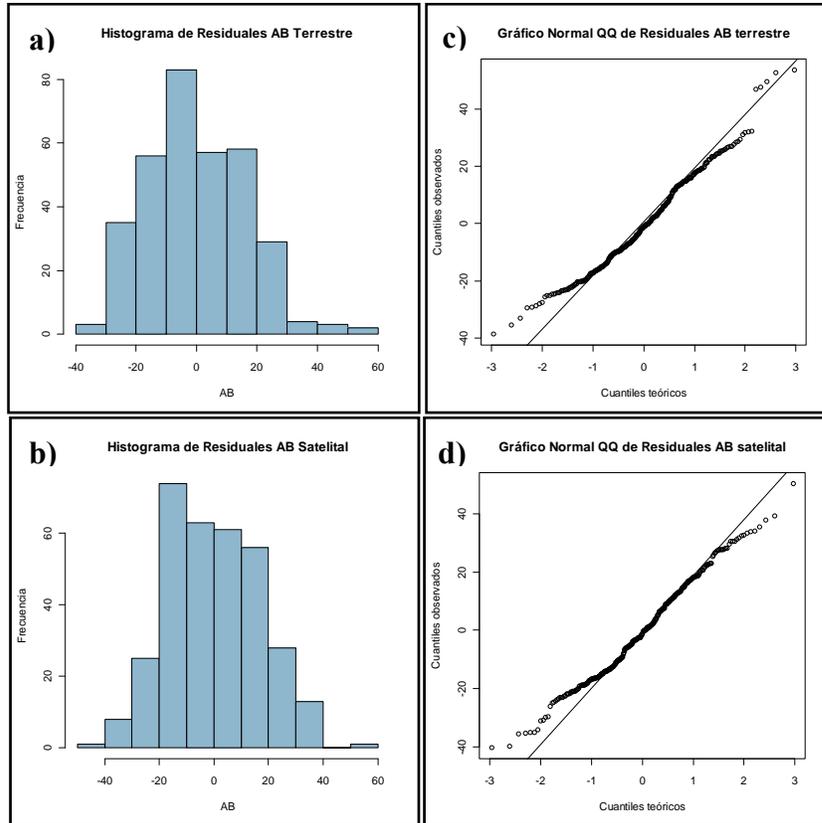


Figura 4.18. a) Histograma de frecuencia de residuales del modelo lineal planteado para AB terrestre en función de la longitud y latitud. b) Histograma de frecuencia de residuales del modelo lineal planteado para AB satelital en función de la longitud y latitud. Apréciense las medias cercanas a cero y las distribuciones aparentemente normales en los histogramas y gráficos QQ.

Tabla 4.7. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB satelital.

R^2	0.4252	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	-1859.696	186.231	-9.986	2.00E-16
	Longitud	-22.495	2.780	-8.092	1.17E-14
	Latitud	34.917	2.653	13.160	2.00E-16
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-38.576	-12.156	-0.995	13.122	53.672

Tabla 4.8. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para AB terrestre.

R^2	0.3933	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coefficientes	Intercepto	-1937.722	189.460	-10.228	2.00E-16
	Longitud	-22.921	2.828	-8.105	1.07E-14
	Latitud	39.873	2.699	14.772	2.00E-16
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-40.354	-13.588	-1.126	12.499	50.525

Estos modelos implican que la AB, tanto satelital como terrestre, tiene una componente sistemática de aumento con la latitud en dirección S-N y de aumento con la longitud de este a oeste (E-O).

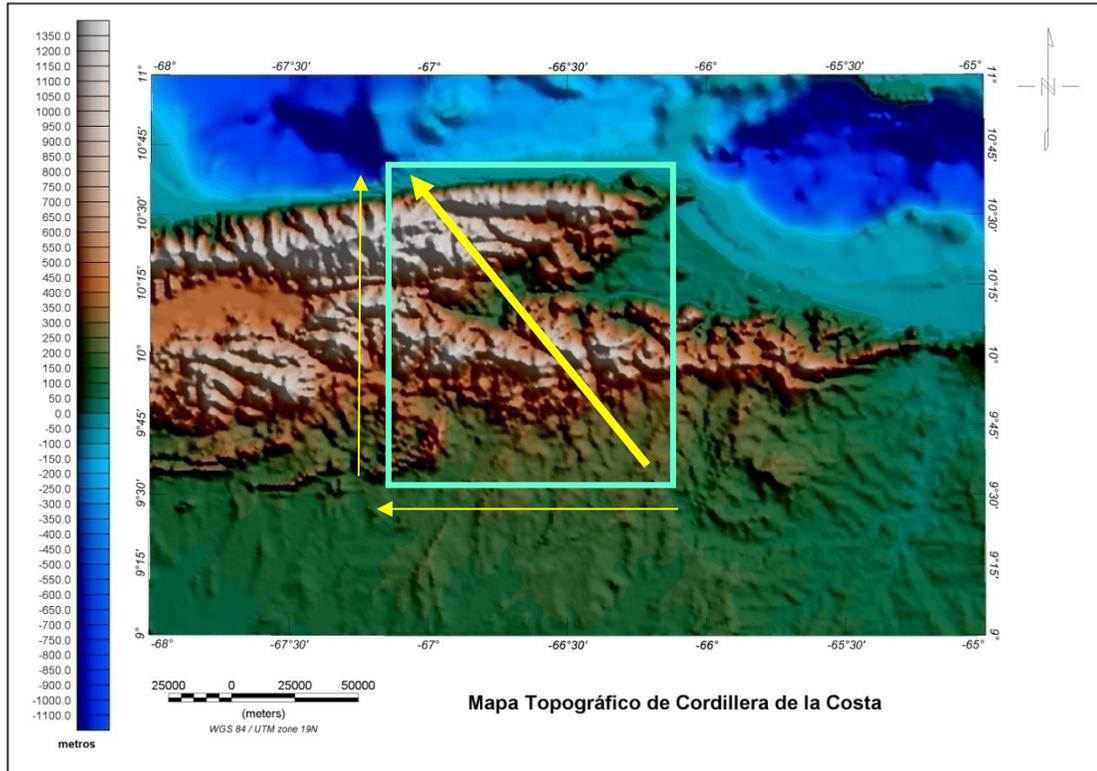


Figura 4.19. Mapa topográfico de la Cordillera de la Costa. El recuadro verde encierra la zona en estudio. Las flechas amarillas indican la dirección de aumento de la AB.

Observando el mapa topográfico de la Cordillera de la Costa (Figura 4.19) podría decirse que probablemente esta tendencia conjunta de la AB satelital y terrestre a

variar con la latitud y longitud en dirección NO-SE tenga su origen en la combinación de dos factores, el primero relacionado con la geología intrínseca de la Cordillera de la Costa, donde los cuerpos tienen claros contrastes laterales y tienden a alienarse en dirección E-O (Hackley et al., 2006), mientras que el segundo factor tiene que ver con la variación progresiva del geode en esta zona en dirección NO-SE (García, 2009).

Se observa igualmente, una alta correlación entre las cotas de los datos terrestres y los de origen satelital, siendo el valor de esta correlación de 0.96. El gráfico de dispersión (Figura 4.20) muestra una clara relación lineal positiva entre ambas variables y un alto coeficiente de ajuste. Podría sugerirse que estos levantamientos al ser más recientes que los de Faja Petrolífera, contaron con un mejor control topográfico.

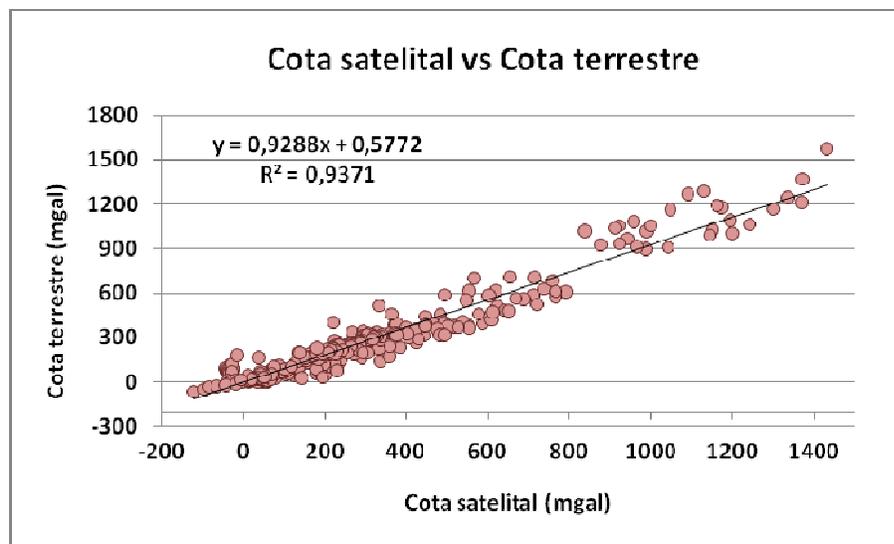


Figura 4.20. Gráfico de dispersión cota satelital contra cota terrestre.

Además, las pruebas con modelos lineales revelan que existe dependencia de las cotas terrestres y satelitales con la longitud (Tablas 4.9 y 4.10), con una alta significancia de los parámetros implicados (intercepto y longitud), pero con un ajuste de tan solo 0.18. Esto implica que la relación lineal está explicando solo parte de la variabilidad de los datos y que aún queda algún tipo de tendencia en los mismos, lo cual se

demuestra al observar que los residuales de los modelos correspondientes no tienen media igual a cero.

Tabla 4.9. Resumen de los valores del modelo lineal para cota satelital en función de la latitud.

R²	0.1805	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	-25974.01	3066.52	-8.47	8.35E-16
	Longitud	-394.74	46.06	-8.571	4.10E-16
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-502.05	-169.98	-64.49	98.56	945.95

Tabla 4.10. Resumen de los valores del modelo lineal para cota terrestre en función de la latitud.

R²	0.1864	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	-25329.89	2931.45	-8.641	2.49E-16
	Longitud	-384.75	44.03	-8.739	2.00E-16
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-453.64	-153.62	-84.3	85.85	1115.06

Por otro lado, se intenta caracterizar las diferencias entre los valores de AB satelital y AB terrestre con la finalidad de descubrir las causas que las producen. Las diferencias de AB se calcularon restando el valor satelital al terrestre y de igual forma para las cotas. La tabla 4.11 contiene el resumen de las variables y se añade además, el valor absoluto de cada una de ellas.

Tabla 4.11. Descriptivos básicos de las diferencias de cotas y AB de los datos satelitales y terrestres.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Diferencia AB (mgal)	-26.11	-4.59	0.00	0.58	5.06	28.67	10.00
Abs (Diferencia AB)	0.00	1.84	4.92	7.30	11.26	28.67	6.84
Diferencia Cota (m)	-198.00	-13.29	14.36	21.39	54.97	198.70	75.94
Abs (Diferencia Cota)	0.42	13.78	32.21	56.85	94.92	198.70	54.63

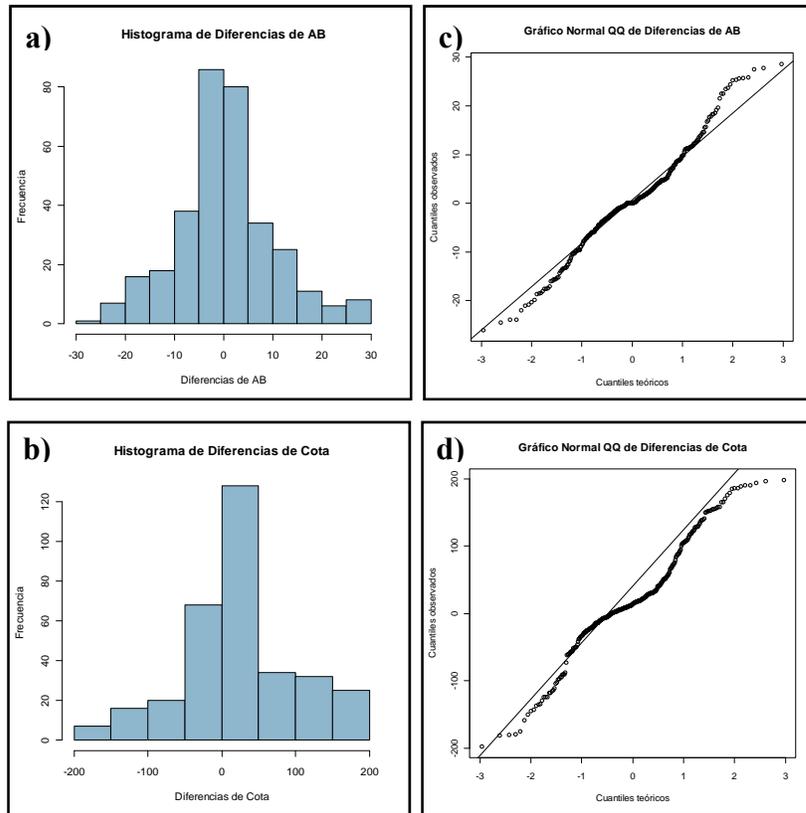


Figura 4.21. a) Histogramas de frecuencia para diferencias de AB. b) Histogramas de frecuencia para diferencias de cotas. c) Gráfico QQ para diferencias de AB. d) Gráfico QQ para diferencias de cotas. Las distribuciones son bastante normales y centradas en cero, lo cual podría ser indicio de aleatoriedad en las diferencias.

Los histogramas de frecuencia y los diagramas de caja y bigotes de las diferencias son mostrados en la Figura 4.21. Las diferencias de AB presentan una distribución normal con media centrada en cero, lo cual podría sugerir que las diferencias son de origen aleatorio. En el caso de las diferencias de cota, el histograma y la tabla resumen indican un buen índice de normalidad y que en promedio las diferencias son cercanas a 50 metros. Para ambos existen valores fuera del rango de la distribución.

Posteriormente, en la Figura 4.22 se evidencia a partir del gráfico de dispersión para las diferencias que no existe ninguna tendencia conjunta, por lo que se decidió confirmar la presencia de alguna dependiente de la longitud y latitud.

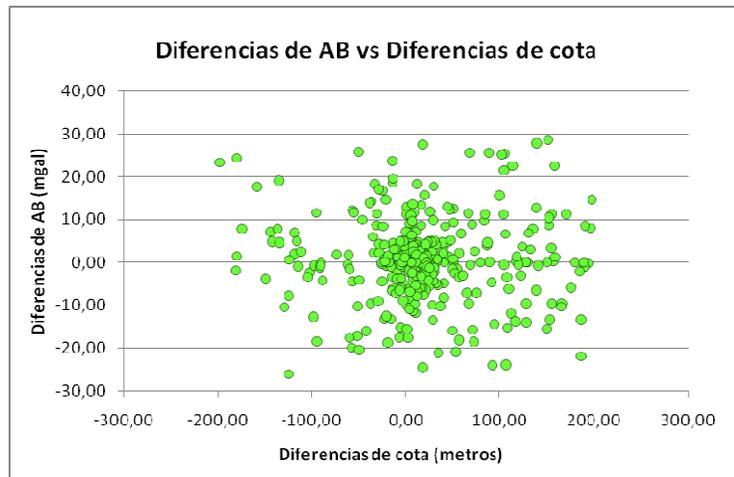


Figura 4.22. Gráfico de dispersión diferencias de AB vs diferencias de cotas.

Se plantearon entonces dos modelos lineales en función de la latitud, uno para cada diferencia. Las tablas 4.12 y 4.13 son los resúmenes asociados a cada modelo. Para ninguno de los dos casos se muestra significancia en alguno de los parámetros y el coeficiente de ajuste es cercano a cero, lo que implica que claramente no existe una relación lineal entre estas dos variables.

Según estos resultados, para el caso de AB toma más fuerza la suposición de que el origen de las diferencias entre AB satelital y terrestre es de origen aleatorio. Este origen casual puede estar relacionado con el uso de instrumental diverso durante las diversas campañas de adquisición, ya que los levantamientos datan de un periodo comprendido entre los años 70 y 2004.

Por otro lado, las causas que generan las diferencias de cota no son claras y los modelos lineales planteados no permiten concluir verazmente. Se presume que nuevamente el factor instrumento esté incidiendo en estas diferencias.

Tabla 4.12. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de cota

R²	0.006831	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coefficientes	Intercepto	243.64	123.1	1.979	0.0486
	Latitud	-21.93	12.14	-1.806	0.0718
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-208.44	-35.75	-10.64	39.77	183.61

Tabla 4.13. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para diferencias de AB.

R²	0.02619	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coefficientes	Intercepto	-49.764	16.051	-3.100	0.002
	Latitud	4.968	1.583	3.138	0.002
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-28.175	-4.724	-0.451	4.934	26.809

La Figura 4.23 corresponde al mapa topográfico con las estaciones con diferencias de cota mayores a 50 m (círculos rosados) y las estaciones que se encuentran en el rango de diferencias inferiores a 50 m (triángulos verdes) sobrepuestas.

A priori, el mapa revela que la mayoría de las estaciones presentan diferencias de cota menores a 50 metros, lo cual es posible observarse en los histogramas de frecuencia de la variable (Figura 4.21b). No se observa evidencia de tendencias en la aglomeración de puntos en zonas preferenciales, parecen estar distribuidas aleatoriamente en general.

Para explicar las estaciones con diferencias mayores a 50 metros, se sabe que el modelo combinado con datos satelitales emplea el modelo topográfico SRMT 90, que parte de un muestreo muy confiable cada 90 metros, el cual en zonas de topografía variable a poca distancia, podría incurrir en errores de cálculo. Para el caso de los datos terrestres, se tienen cinco fuentes distintas contribuyendo al carácter aleatorio de su efecto.

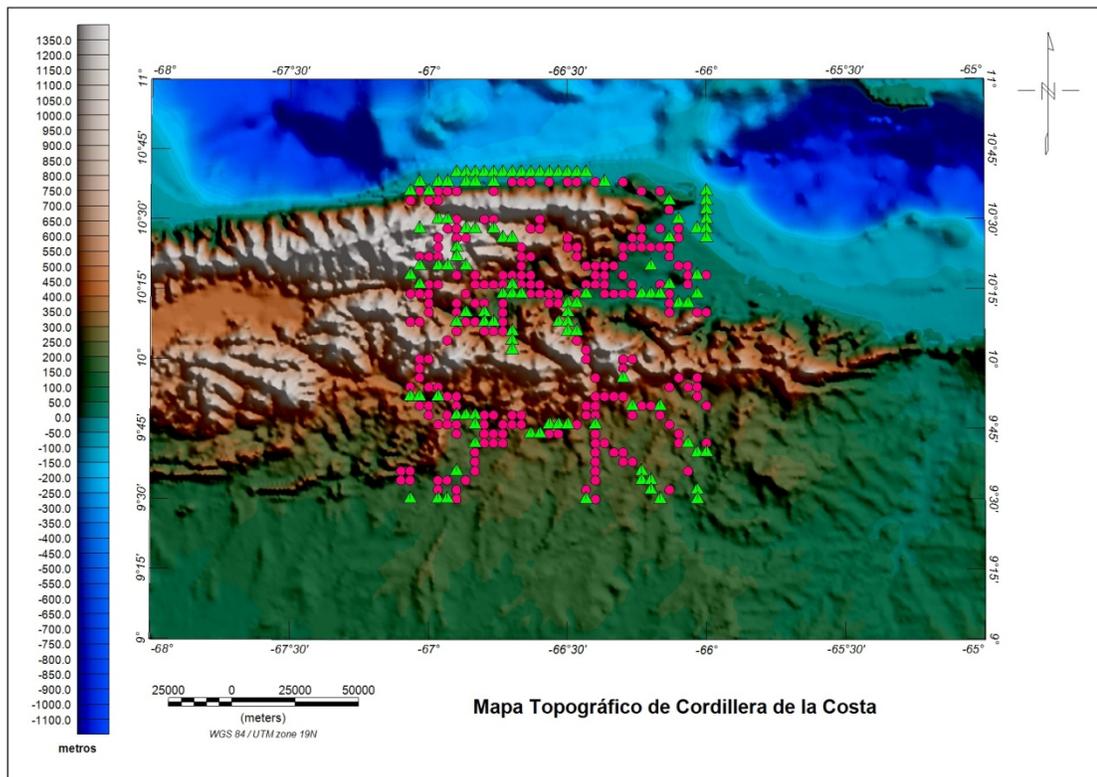


Figura 4.23. Mapa topográfico de la Cordillera de la Costa y estaciones con diferencias de cota menores y mayores a 50 m (círculos rosados y triángulos verdes, respectivamente). Nótese el carácter aleatorio de la ubicación de estas estaciones.

4.2.3 Geoestadística: Kriging

El Kriging se realizó con el software de programación estadística R (R Development Core Team, 2009) y los paquetes de análisis geoestadístico SP y gstat. Los datos de entrada fueron los datos de AB terrestres y satelitales originales, sin ser sometidos a algoritmos de muestreo.

4.2.3.1 Variografía

A partir de los datos de AB terrestres y satelitales se realizó la variografía antecedente al Kriging. Lo primero fue generar los mapas de variograma para establecer las tendencias preferenciales de continuidad (Figura 4.24). El *cutoff* o distancia máxima

de alcance empleada fue de 1 grado y el ancho de las ventanas de búsqueda de puntos igual a 0.07 grados. Los datos terrestres y satelitales muestran una dirección análoga de máxima continuidad a 245° (grados a partir del norte) y de mínima continuidad a 155°.

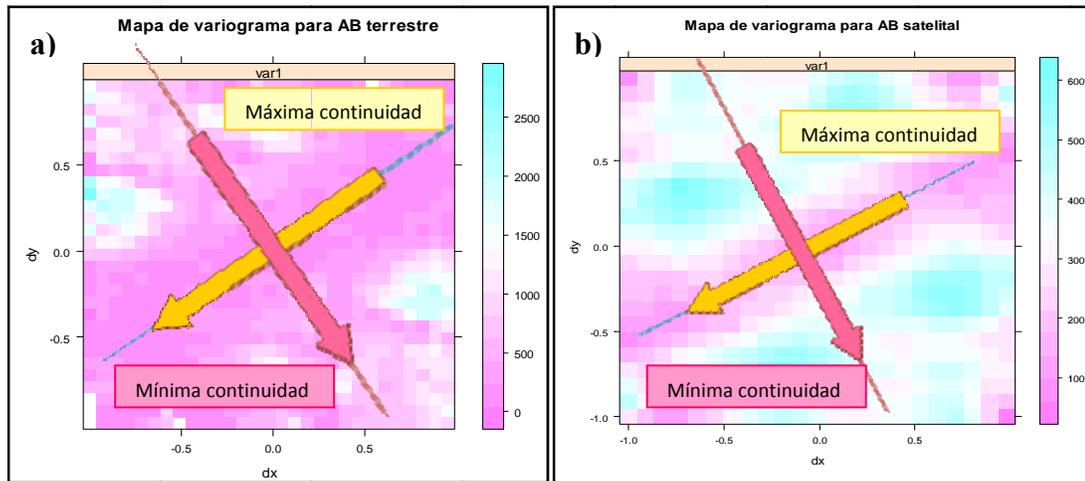


Figura 4.24. a) Mapa de variograma para AB terrestre. b) Mapa de variograma para AB satelital. Nótese que ambos variogramas presentan las mismas direcciones preferenciales.

Luego, en base a las tendencias observadas en el mapa de variograma se realizaron los variogramas experimentales (Figura 4.25). Para el caso terrestre, la distancia máxima de alcance para este caso fue de 0.5 grados y el ancho de la ventana de búsqueda igual a 0.0025. El variograma fue ajustado empleando un modelo gaussiano, cuyos parámetros de ajuste fueron: $sill = 200$, $nugget = 20$, $rango = 0.12$ y relación $RangoMenor/RangoMayor$ igual a 0.6.

El variograma experimental correspondiente a los datos satelitales se elaboró con una distancia máxima de alcance de 0.9 y ancho de ventana igual a 0.07. Fue ajustado con un modelo exponencial, con $sill$ igual a 200, $nugget = 40$, $rango = 0.2$ y relación $RangoMenor/RangoMayor$ igual a 0.5.

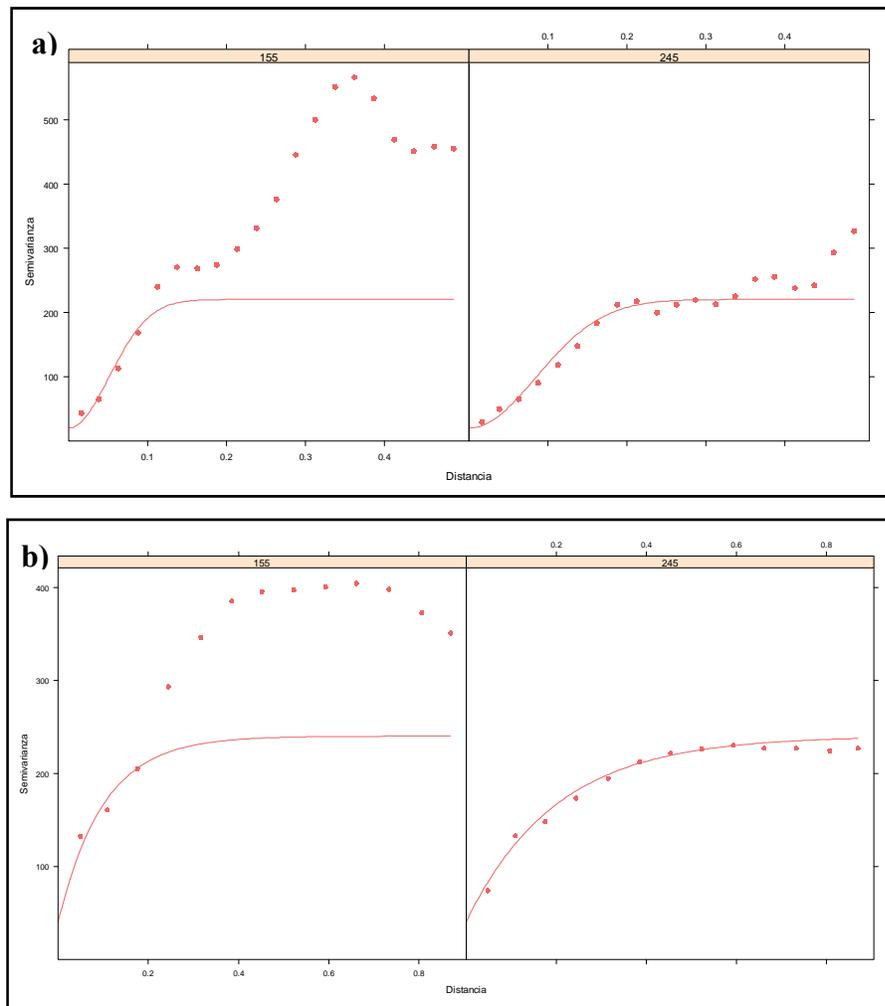


Figura 4.25. a) Variograma teórico ajustado para direcciones preferenciales de AB terrestre. b) Variograma teórico ajustado para direcciones preferenciales de AB satelital.

Para ambos casos se muestra un evidente efecto *nugget* diferente de cero, lo cual implica que la variable es muy irregular, y que existen estructuras o “ruido geológico” de un rango más pequeño que la distancia de muestreo asignada para el variograma. El valor del *nugget* es más alto en el caso satelital, porque aún cuando las estaciones están bien distribuidas, se encuentran distanciadas regularmente cada 3.7 km aproximadamente y variaciones de rango menor a esta distancia no pueden ser percibidas por el variograma.

Los datos terrestres respondieron mejor a un modelo gaussiano, lo cual sugiere que esta variable presenta suaves variaciones a lo largo de la distancia. Sin embargo, el efecto nugget combinado con este comportamiento gaussiano indica que a cortas distancias las variaciones son más abruptas que a distancias largas. Podrían sugerirse entonces presencia de cierres dentro de tendencias regionales.

Contrariamente, los datos satelitales ajustaron con un modelo exponencial, de alta variabilidad con la distancia, lo cual aunado a la presencia del efecto nugget indica que la variable es bastante irregular fuera de la dirección de máxima continuidad. Nuevamente los niveles de resolución alcanzados por los datos satelitales son superiores a los presentados por los datos terrestres, que muestran en general variaciones suaves.

Por otro lado, el aparente efecto *hole* en el variograma experimental de AB terrestre puede ser debido a fluctuaciones estadísticas simples y no debe ser asociado a eventos periódicos como la presencia de cierres en las direcciones preferenciales de continuidad si no es comprobable.

4.2.3.2 Estimación por Kriging

Para la estimación por Kriging de AB terrestre se utilizó como mallado de destino las localizaciones satelitales. La Figura 4.26 corresponde al mapa final de AB terrestre, a partir de la predicción hecha por el Kriging, el cual muestra que la presencia de numerosos cierres enmascaran de cierta forma el carácter regional del mapa.

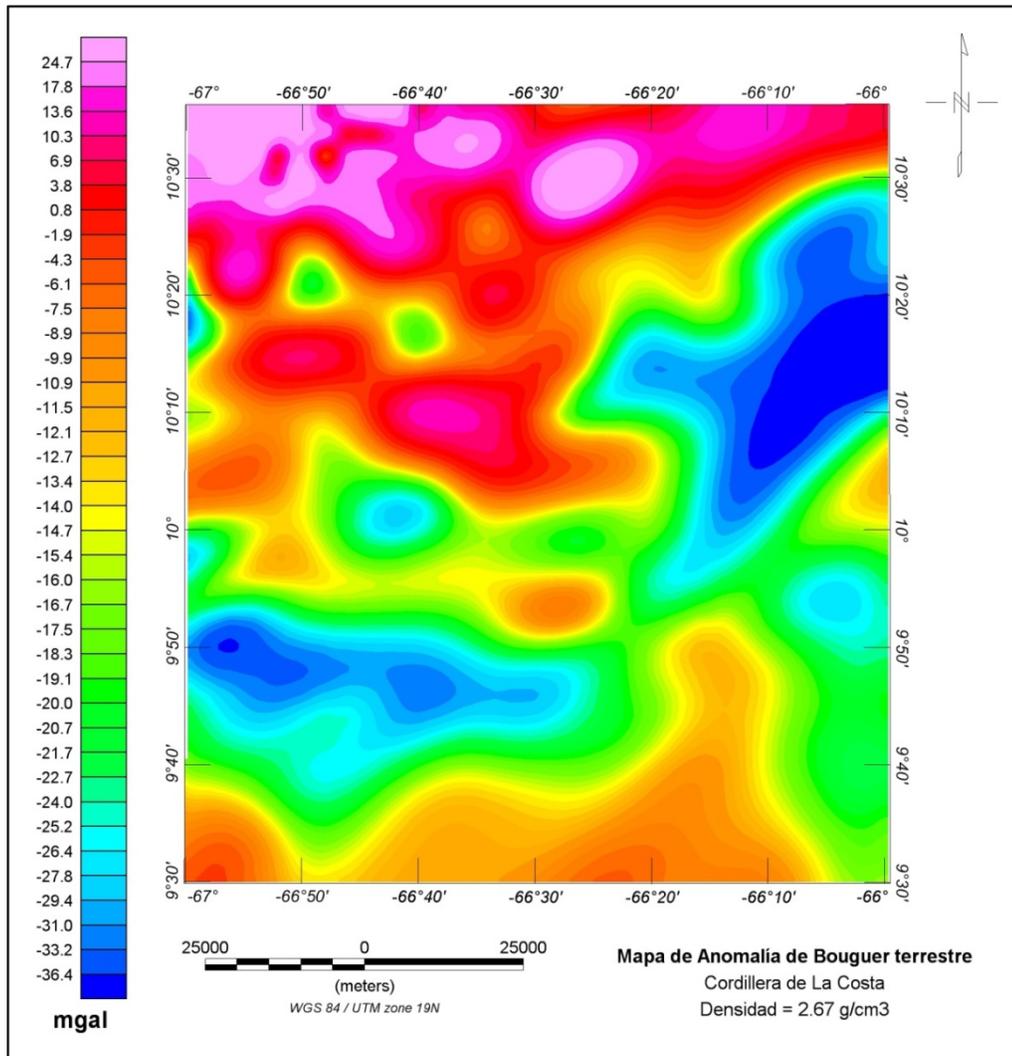


Figura 4.25. Mapa de AB terrestre estimado a partir de Kriging. Nótese la tendencia regional marcada en sentido SO-NE.

Al igual que para la sección de estadísticos básicos y modelos lineales, se observa a partir del mapa que la anomalía de Bouguer presenta un aumento progresivo en sentido NO-SE. De la misma manera, se observa una tendencia regional muy marcada en sentido SO-NE, lo cual guarda relación con la presencia de cuerpos geológicos de la Cordillera de la Costa a partir de los 10 grados de latitud.

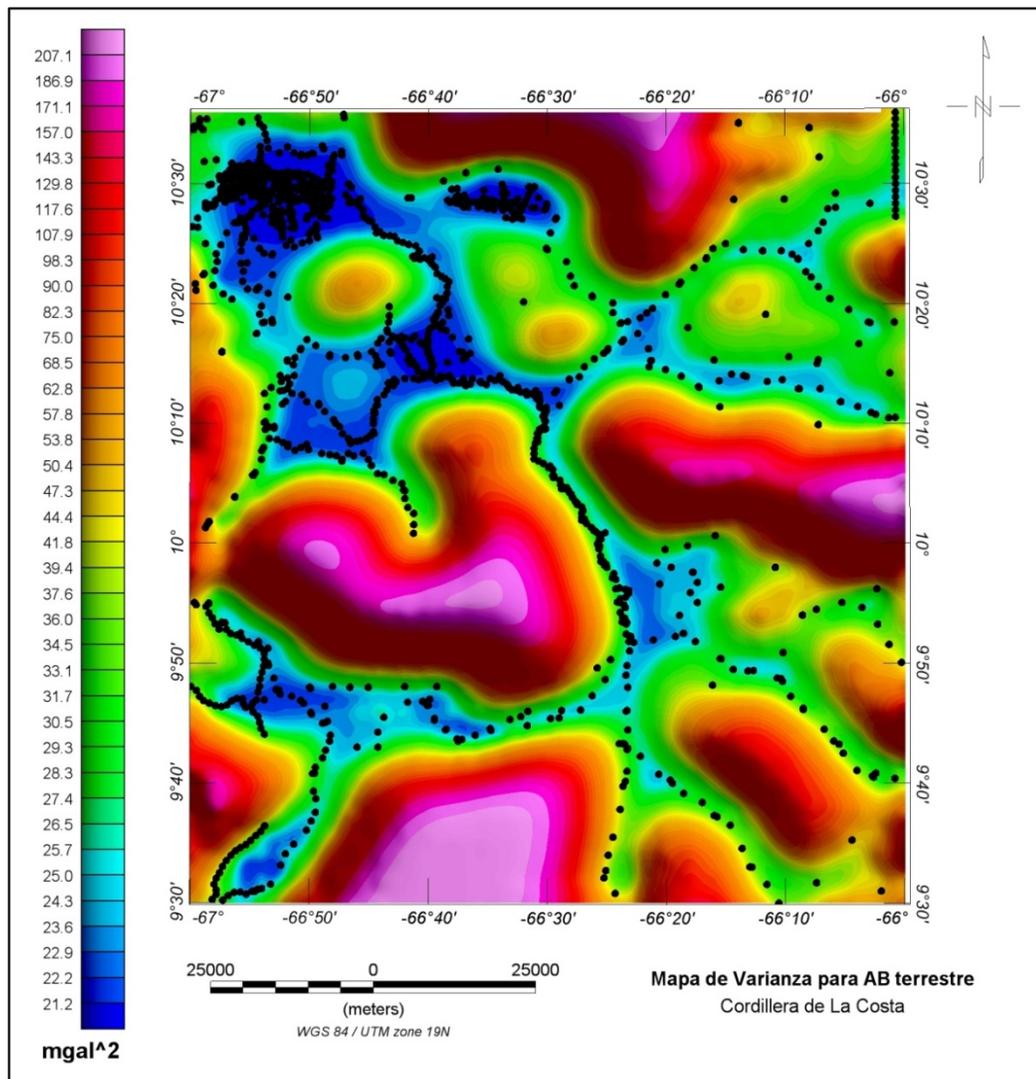


Figura 4.26. Mapa de Varianza estimado a partir de Kriging para AB terrestre.

La Figura 4.26 es el mapa de varianzas asociado a dichas estimaciones, al cual se le han añadido la ubicación de los datos (puntos negros). En general, las estimaciones son más robustas en los sitios donde se ubican los datos y en sus alrededores inmediatos, por lo tanto, la varianza debe ser mínima. Caso contrario ocurre en aquellas zonas donde hay ausencia de estaciones, donde la varianza es máxima y los valores estimados son promedios de los valores globales.

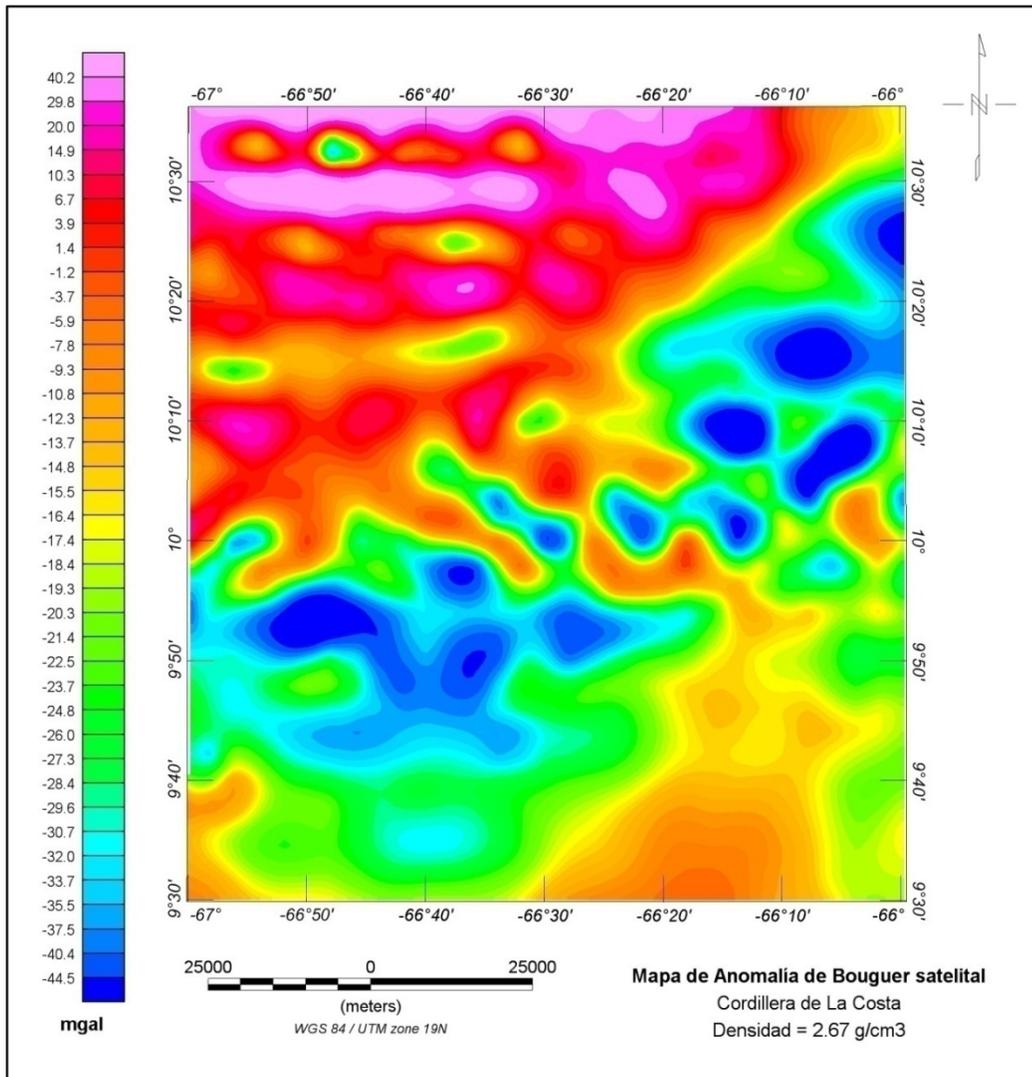


Figura 4.27. Mapa de AB satelital estimado a partir de Mínima Curvatura. Al igual que para el mapa de AB terrestre se observa una tendencia regional bastante obvia en dirección SO-NE.

Para realizar la comparación cualitativa con el mapa de AB terrestre generado por Kriging, se hizo la interpolación de los datos satelitales con el mismo proceso. El mapa de AB satelital generado (Figura 4.27) muestra la influencia de un efecto regional importante con dirección preferencial NE-SO, el cual se encuentra enmascarado por una gran cantidad de irregularidades locales que se traducen en cierres a lo largo de todo el mapa. Es probable que estos cierres estén asociados con

la distribución de densidades en profundidad, dada la gran variabilidad litológica encontrada en la Cordillera de la Costa.

Las diferencias más evidentes entre el mapa de AB satelital y el terrestre tienen relación con la resolución y ubicación de los datos empleados, lo cual se evidencia en las suaves tendencias presentes en el mapa de anomalía de Bouguer terrestre y en las grandes irregularidades del mapa satelital.

4.2.3.3 Intervalos de confianza

El análisis estadístico básico previo al Kriging tenía como finalidad certificar que los datos de entrada empleados por el interpolador se distribuyeran normalmente, pues de esta forma se pueden estimar los intervalos de confianza para cada punto.

Los valores de varianza generados por el Kriging permitieron calcular las superficies asociadas a los intervalos de confianza alrededor de los valores estimados para los datos de tierra o incertidumbre permitida, al usar la fórmula $\mu \pm n\sigma$, para un intervalo del 95%.

Se obtuvo que en un 99.8% de los casos los datos de satélite se encuentran dentro del intervalo de confianza establecido. El 0.2% restante son estaciones situadas en uno de los límites de la zona en estudio y la discrepancia asociada está relacionada con problemas de borde durante la estimación.

El análisis estadístico y geoestadístico realizado para los datos satelitales y de tierra de la Cordillera de la Costa muestra una analogía innegable entre los conjuntos de datos, en función de sus valores numéricos y comportamiento espacial.

De esta forma se verifica que la distribución espacial inherente a los datos utilizados para realizar los mapas, es importante para obtener resultados de calidad que permitan establecer interpretaciones sólidas y precisas del comportamiento gravimétrico en profundidad de las estructuras presentes en determinada zona de estudio. Es vital

tratar en lo posible de generar mapas con cobertura regular, característica principal de los datos de origen satelital, la cual no siempre es posible encontrar en datos adquiridos tradicionalmente en tierra.

4.3. RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL

4.3.1. Resolución de los datos

A partir de un algoritmo en lenguaje Matlab se asignaron a las 93 estaciones de gravedad absoluta terrestre un valor único de gravedad observada del modelo integrado con datos satelitales.

4.3.2 Estadísticos básicos y modelos lineales

Luego de obtener los valores de gravedad satelital y terrestre resolución única, se calcularon las diferencias de gravedad en cada punto y se realizó la estadística descriptiva de los datos satelitales y terrestres, a partir de la cual se obtuvo información inicial sobre las variables.

Tabla 4.14. Descriptivos básicos de las datos de gravedad observada satelitales y terrestres.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Gravedad Obs. Terrestre (mgal)	977900	978100	978200	978200	978200	978300	78.21064
Gravedad Obs. Satelital (mgal)	978000	978100	978200	978100	978200	978300	77.71426

La tabla 4.14 muestra que los datos de gravedad observada de ambas fuentes presentan valores equivalentes dentro de los intervalos expuestos. El valor de media y mediana coinciden, hecho que se traduce en una distribución simétrica, como sucede en las distribuciones normales. Las diferencias más significativas entre los conjuntos de datos se aprecian hacia los valores medios; asimismo, las desviaciones estándar son bajas y similares.

Para la evaluación cualitativa preliminar de los datos se realizaron los histogramas de frecuencia y gráficos QQ (Figura 4.28), los cuales indican que ambas variables

reflejan distribuciones similares, aparentemente normales pero sesgadas hacia los valores altos. El gráfico QQ lo comprueba al presentar un buen ajuste a la recta teórica normal en sus valores medios y una desviación importante de los datos para los valores extremos.

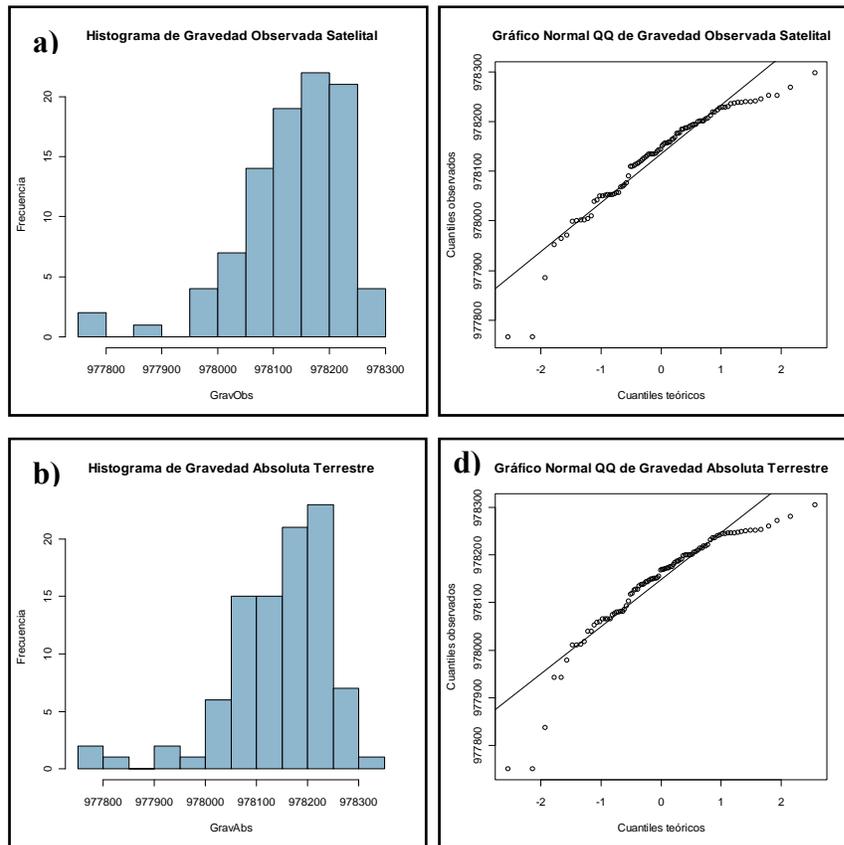


Figura 4.28. a) Histograma de frecuencia para gravedad observada satelital. b) Histograma de frecuencia para gravedad observada terrestre. c) Gráfico QQ para gravedad observada satelital. d) Gráfico QQ para gravedad observada terrestre. Nótese que ambas variables presentan distribuciones similares, algo sesgadas hacia los valores altos. El gráfico QQ muestra un buen ajuste a la recta teórica normal en sus valores medios.

El paso siguiente fue genera diagramas de cajas y bigotes (Figura 4.29) para gravedad observada satelital y terrestre, con la finalidad de controlar la presencia de los valores atípicos y mejorar en lo posible la forma de la distribución de ambos conjuntos de datos.

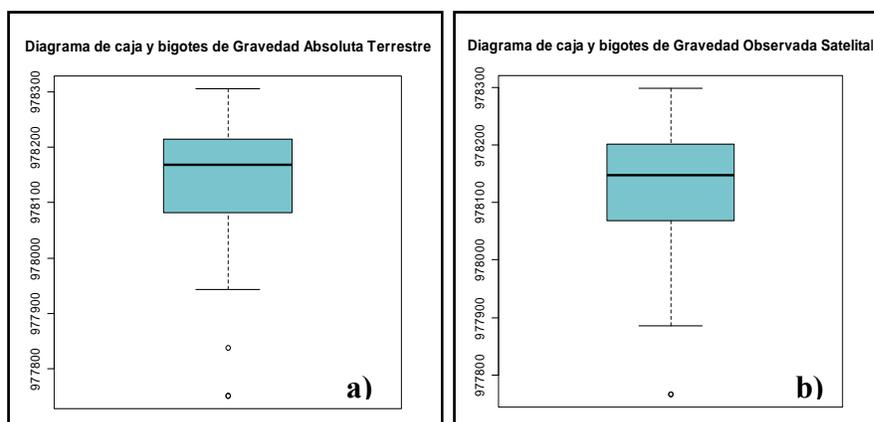


Figura 4.29. a) Diagrama de caja y bigote para gravedad observada satelital. b) Diagrama de caja y bigote para gravedad observada terrestre. Se presentan algunos valores fuera de rango para ambos conjuntos de datos.

Los datos fuera de rango presentados por los diagramas se encuentran hacia los valores más bajos de gravedad observada, lo cual ya había sido apreciado en los gráficos presentados con anterioridad. Sin embargo, antes de tomar alguna medida sobre estos puntos se consideró relevante evaluar las diferencias entre los datos, restando el valor de gravedad terrestre al valor de gravedad equivalente en satélite, y tomándose los valores absolutos de estas diferencias.

Tabla 4.15. Descriptivos básicos de las diferencias gravedad observada.

<i>Variable</i>	<i>Mín.</i>	<i>1er. Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Media</i>	<i>3er. Cuartil</i>	<i>Máx.</i>	<i>Desv.Están</i>
Diferencia Grav.Obs (mgal)	-21.402	5.490	12.352	12.667	19.414	42.462	13.334
Abs (Dif. Grav.Obs) (mgal)	0.101	8.164	13.060	15.670	19.970	48.140	8.664

Según la tabla 4.15, las diferencias son en promedio cercanas a 15 miligales, lo cual implica que los errores que causan las diferencias entre los datos satelitales y terrestres no son casuales o aleatorios, puesto que aunque parecen ser normales, no se encuentran centrados en cero.

Luego se realizaron el histograma de frecuencia y el gráfico QQ para las diferencias de gravedad (Figura 4.30) para confirmar el tipo de distribución presente en esta variable.

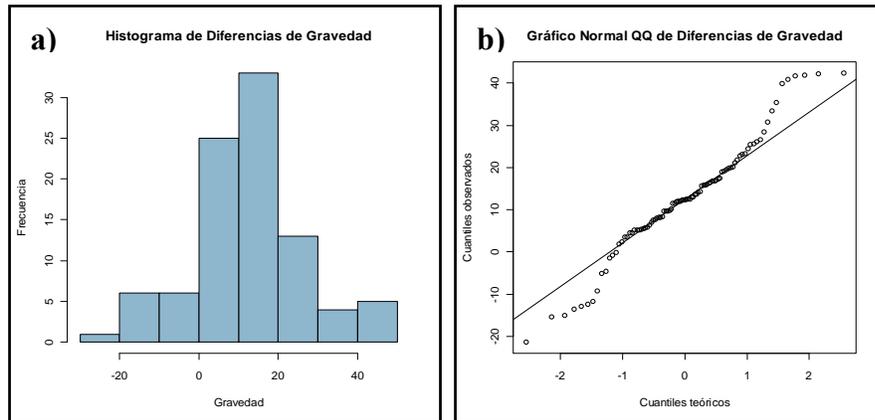


Figura 4.30. a) Histograma de frecuencia para diferencias de gravedad observada. b) Gráfico QQ para diferencias de gravedad observada.

Las diferencias de gravedad muestran un ajuste bueno a la distribución normal. Sin embargo, se presentan algunos valores extremos bajos, los cuales perjudican el ajuste con la recta normal teórica.

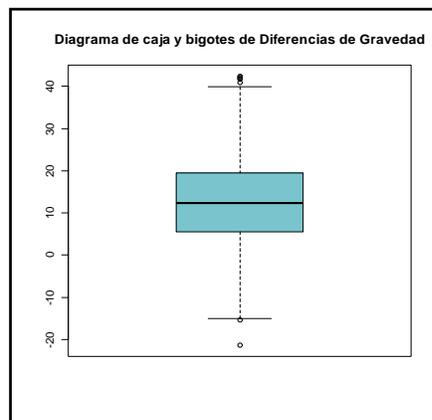


Figura 4.31. Diagrama de caja y bigote para diferencias de gravedad observada.

De igual manera, se presenta el diagrama de cajas y bigotes de las diferencias de gravedad (Figura 4.31), donde se aprecian valores atípicos en ambos extremos. Por

esta razón y habiendo observado el mismo comportamiento en los datos de gravedad, se aplicó en última instancia la prueba $\mu \pm n\sigma$ para eliminar todos aquellos datos fuera del intervalo definido.

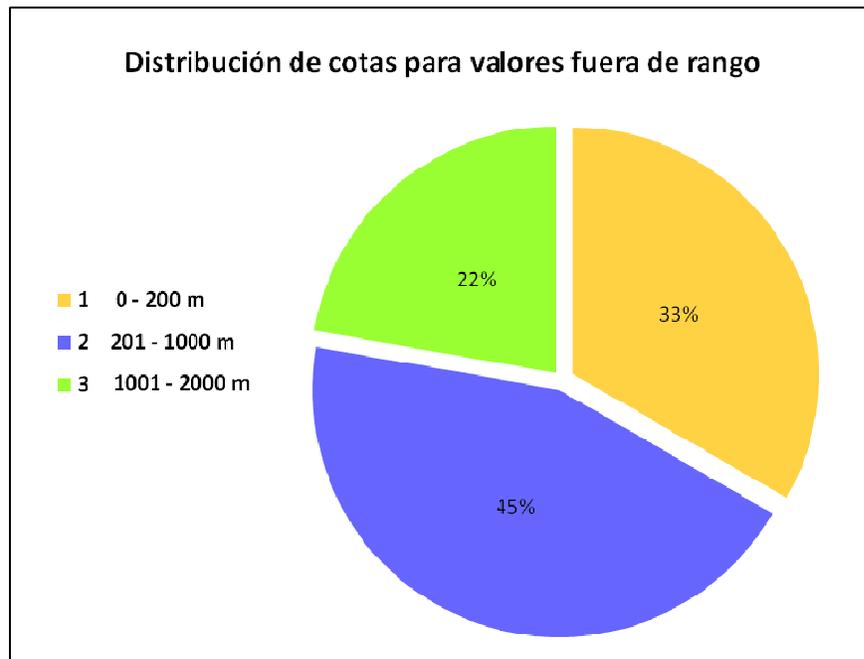


Figura 4.32. Gráfico de distribución de cotas para valores fuera de rango.

Con un intervalo de confianza del 97% se descartaron un total de 9 estaciones, cuya distribución de cotas se muestra en el gráfico siguiente (Figura 4.32), el cual indica que aproximadamente el 67% de estas estaciones presentan elevaciones por encima de 200 metros de altura, mientras que tan solo el 33% corresponden con cotas pequeñas.

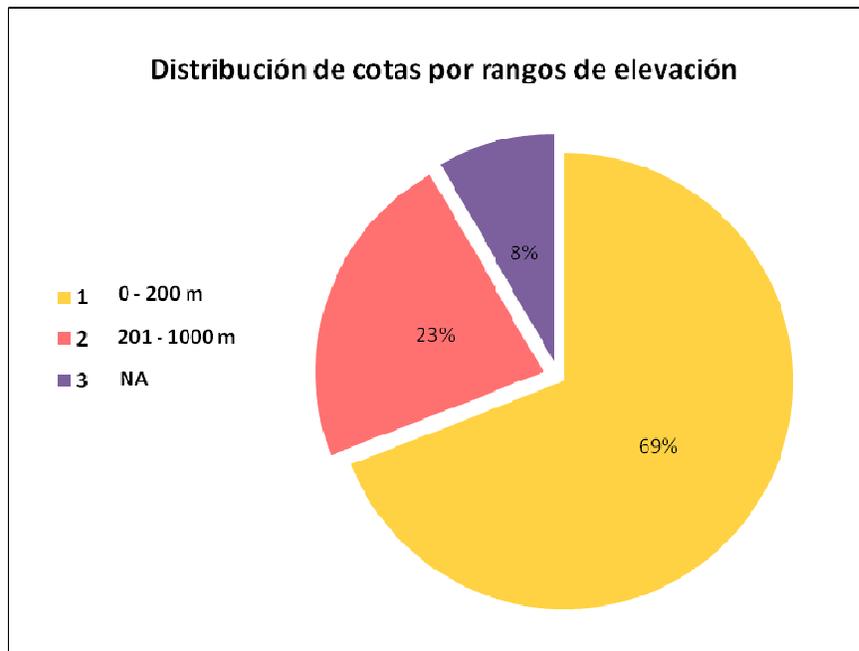


Figura 4.33. Nuevo gráfico de distribución de cotas de estaciones por rangos de elevación.

De esta manera, la proporción de cotas una vez filtrados los conjuntos de datos se mantiene relativamente similar, tal como se observa en la Figura 4.33, siendo la diferencia más notable la ausencia de estaciones con cotas conocidas mayores a 1000 metros.

En seguida, se realizaron nuevamente todos los gráficos de las variables en estudio y sus diferencias, comprobándose una mejora sustancial en la distribución y ajuste de los datos a las rectas de normalidad en los gráficos QQ (Figura 4.34).

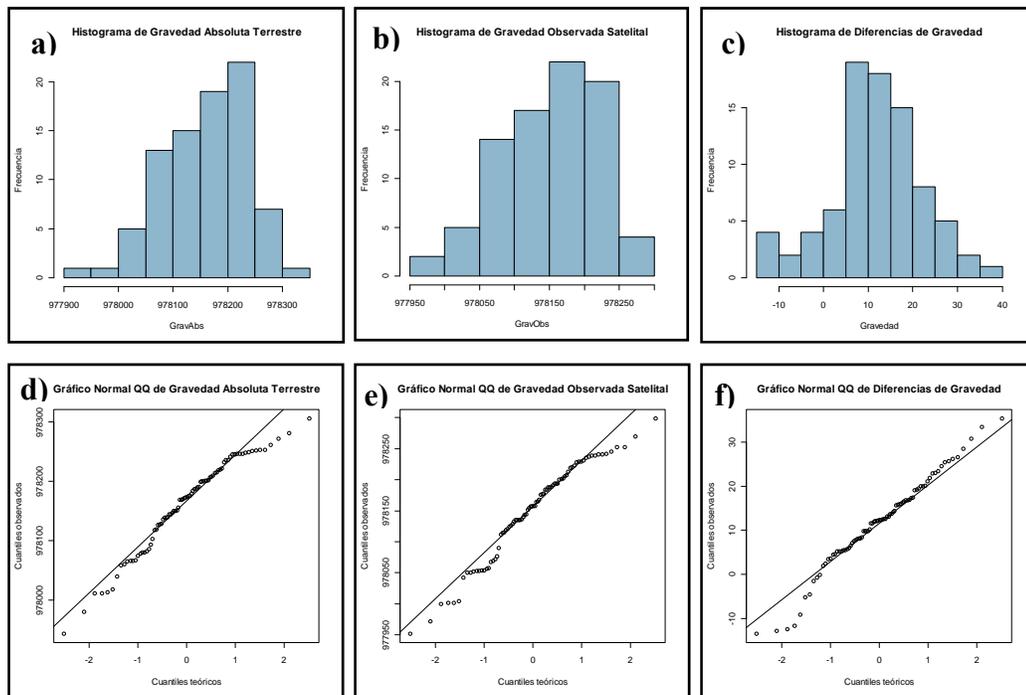


Figura 4.34. a) Histograma de frecuencia para gravedad observada terrestre. b) Histograma de frecuencia para gravedad observada satelital. c) a) Histograma de frecuencia para diferencias de gravedad. d) Gráfico QQ para gravedad observada terrestre. e) Gráfico QQ para gravedad observada satelital. f) Gráfico QQ para diferencias de gravedad.

Igualmente, se presentan en la tabla 4.16 los descriptivos básicos calculados después del proceso de filtrado de los datos. Al retirar los datos fuera de rango el promedio de las diferencias de gravedad disminuyó cerca de 3 miligales y se ubica ahora en 11.6 miligales. Los estadísticos en general se mantienen intactos y como es de esperarse disminuye el valor de la desviación estándar de las variables.

Tabla 4.16. Descriptivos básicos de las datos de gravedad observada satelitales y terrestres.

Variable	Mín.	1er. Cuartil	Mediana	Media	3er. Cuartil	Máx.	Desv.Están
Gravedad Obs. Terrestre (mgal)	977900	978100	978200	978200	978200	978300	77.516
Gravedad Obs. Satelital (mgal)	978000	978100	978200	978100	978200	978300	76.717
Diferencia Grav.Obs (mgal)	-13.49	5.639	12.26	11.67	17.37	35.37	10.148

Posteriormente, con la única finalidad de observar y comparar tendencias espaciales preliminares, se presentan los mapas para gravedad satelital y terrestre elaborados con los datos muestreados y filtrados, con el método de vecinos naturales (Figura 4.35).

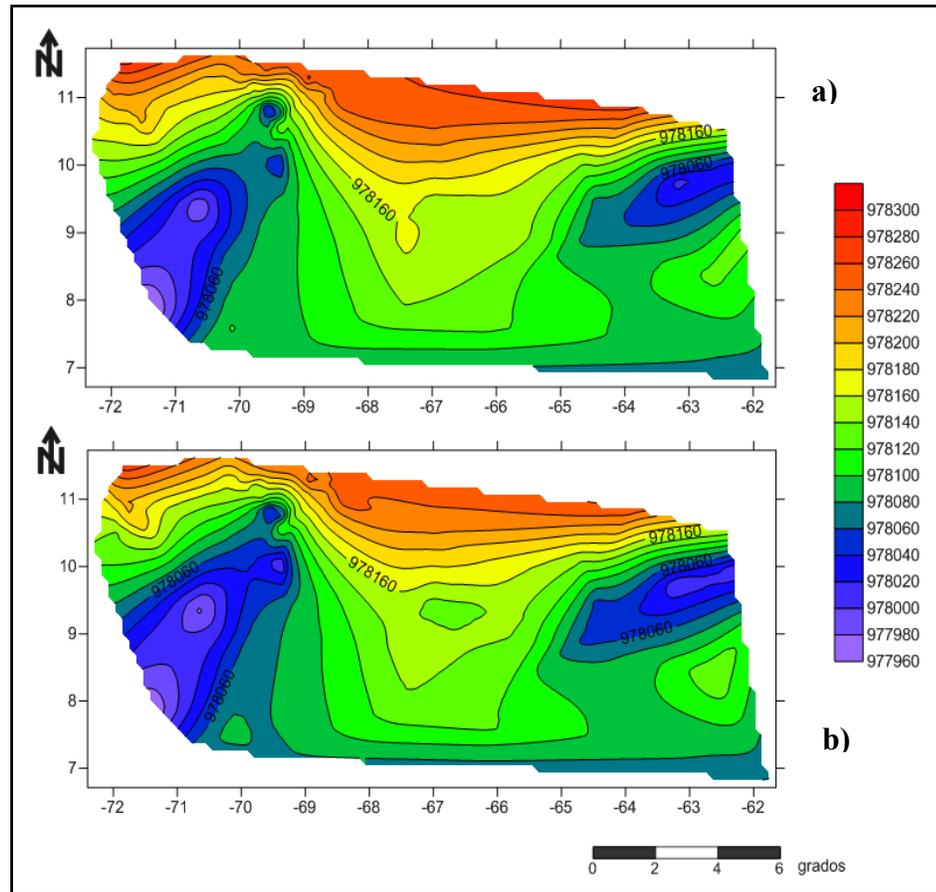


Figura 4.35. Mapas preliminares de gravedad observada terrestre (a) y satelital (b). Las tendencias generales y los valores de gravedad mostrados en ambos mapas son bastante semejantes.

En líneas generales, las tendencias generales marcadas por los contornos y los valores de gravedad mostrados en ambos mapas son bastante concordantes. Un aspecto resaltante es que se observan delimitadas en azul, las respuestas gravimétricas asociadas a los Andes de Mérida y Cuenca Oriental, y en verde las zonas correspondientes a los llanos venezolanos. Esta afinidad espacial inicial respalda la analogía encontrada en los datos desde el punto de vista numérico y estadístico.

Para entrar de lleno al análisis espacial se construyó un mapa de percentiles a partir de los valores absolutos de las diferencias de gravedad (Figura 4.36), con el objetivo de ubicar aquellas zonas de contrastes considerables entre los datos satelitales y terrestres. Las mayores diferencias parecen aglomerarse hacia el noroeste del mapa, donde se encuentra un porcentaje significativo de los datos totales.

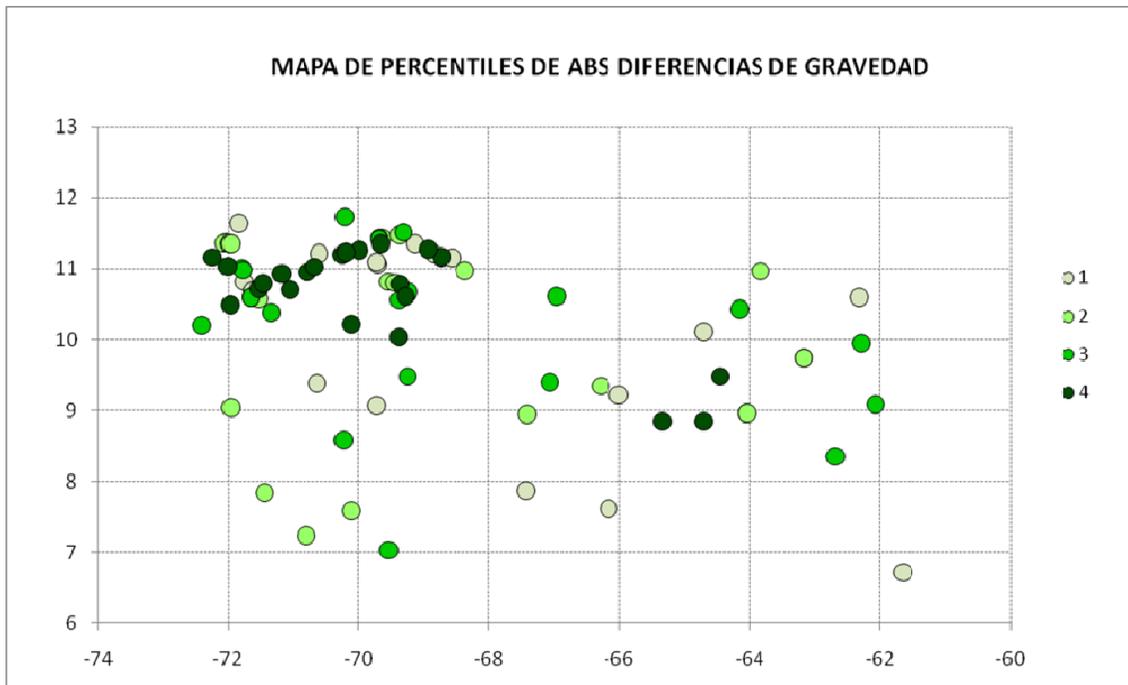


Figura 4.36. Mapa de percentiles para valores absolutos de las diferencias de gravedad observada.

Luego, se evaluó la dependencia lineal entre los datos, al realizarse el gráfico de dispersión que relaciona la gravedad observada satelital con la terrestre (Figura 4.37). Este mostró que las dos variables se encuentran ampliamente relacionadas a partir de una clara tendencia positiva, cuyo coeficiente de correlación es 0.98.

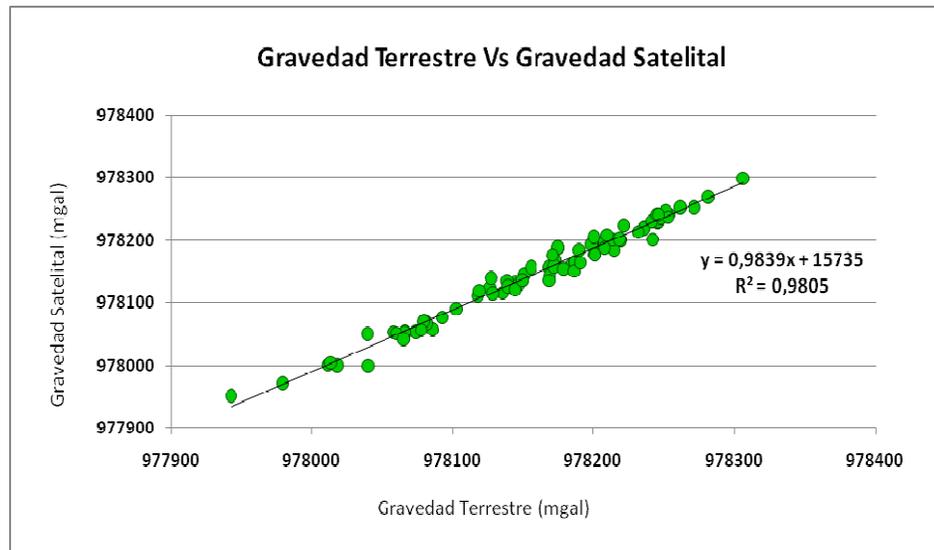


Figura 4.37. Gráfico de dispersión gravedad observada terrestre contra gravedad observada satelital.

El resumen numérico del modelo lineal planteado para la gravedad observada terrestre y satelital se presenta en la tabla 4.17.

Tabla 4.17. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada.

R^2	0.9805	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	3426.00	15010.00	0.23	0.82
	GravSat	1.00	0.02	64.94	2.00E-16
Residuales	Min	1Q	Mediana	3Q	Max
	-25.68747	-6.50043	-0.01367	6.39941	28.73608

Del mismo modo, se plantearon dos modelos lineales en función de la latitud para gravedad observada y satelital (Tablas 4.18 y 4.19). Para los dos modelos, la latitud y el intercepto presentan una significancia muy alta dentro del modelo y son bastante similares; además, el coeficiente de ajuste R^2 es bueno.

Tabla 4.18. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada terrestre

R^2	0.4317	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	977700.00	54.30	18005.16	2.00E-16
	Latitud	42.68	5.27	8.10	3.88E-12
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-171.96	-24.1	16.4	38.67	90.02

Tabla 4.19. Resumen de los valores del modelo lineal planteado para gravedad observada satelital

R^2	0.3989	Estimado	Desv.Est.Error	Valor t	Pr(> t)
Coeficientes	Intercepto	977700.00	55.49	17620.10	2.00E-16
	Latitud	40.82	5.39	7.58	4.22E-11
Residuales	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-166.69	-29.91	19.39	42.87	93.63

Asimismo, las superficies de tendencia asociadas a los modelos (Figura 4.38) exhiben de forma más evidente dicho comportamiento y manifiestan la similitud entre las variaciones de gravedad con la latitud, corroborado numéricamente en el resumen del modelo lineal.

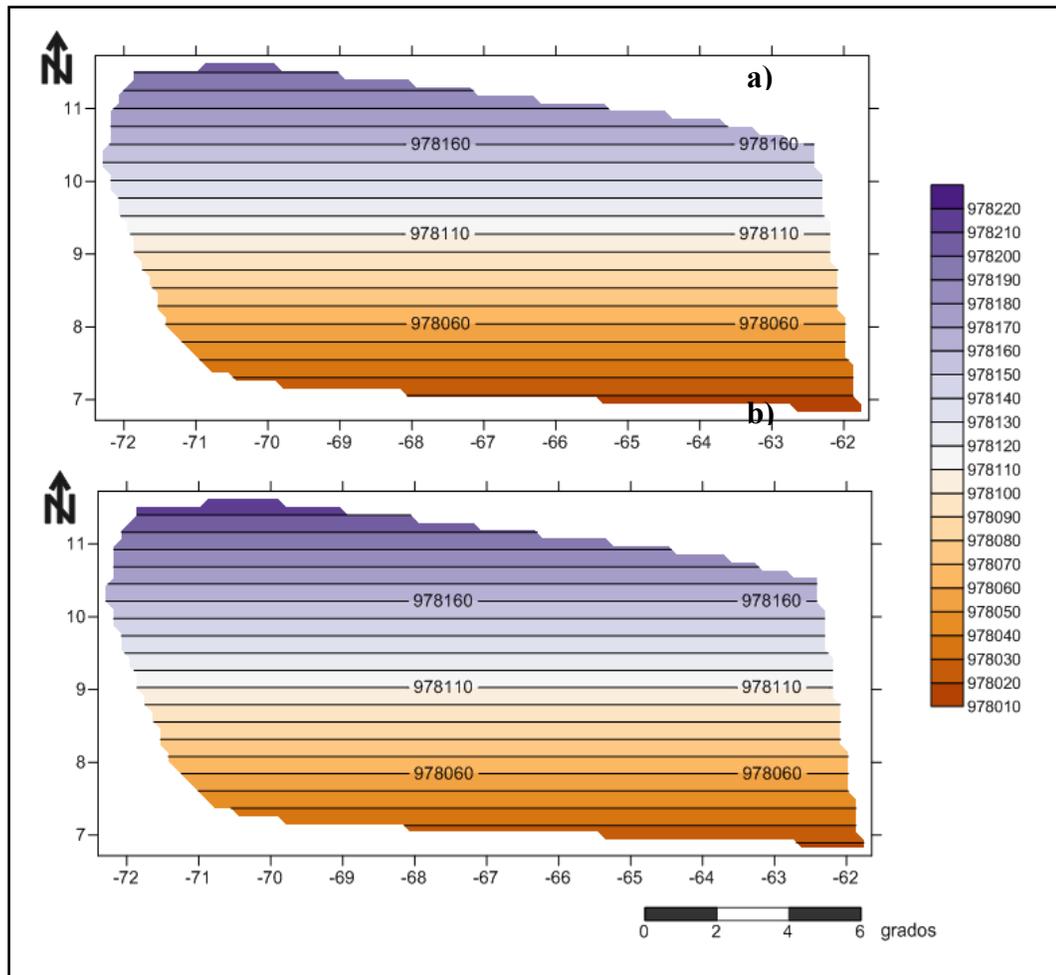


Figura 4.38. Superficies de tendencia asociadas a los modelos lineales planteados para gravedad observada terrestre (a) y satelital (b) contra latitud. La variación es similar para los dos conjuntos de datos.

Contrariamente, las diferencias de gravedad presentan una tendencia espacial poco perceptible; sin embargo, a modo subjetivo, las diferencias de gravedad observadas parecen tener una dependencia positiva con la latitud, que incrementa hacia el norte (Figura 4.39).

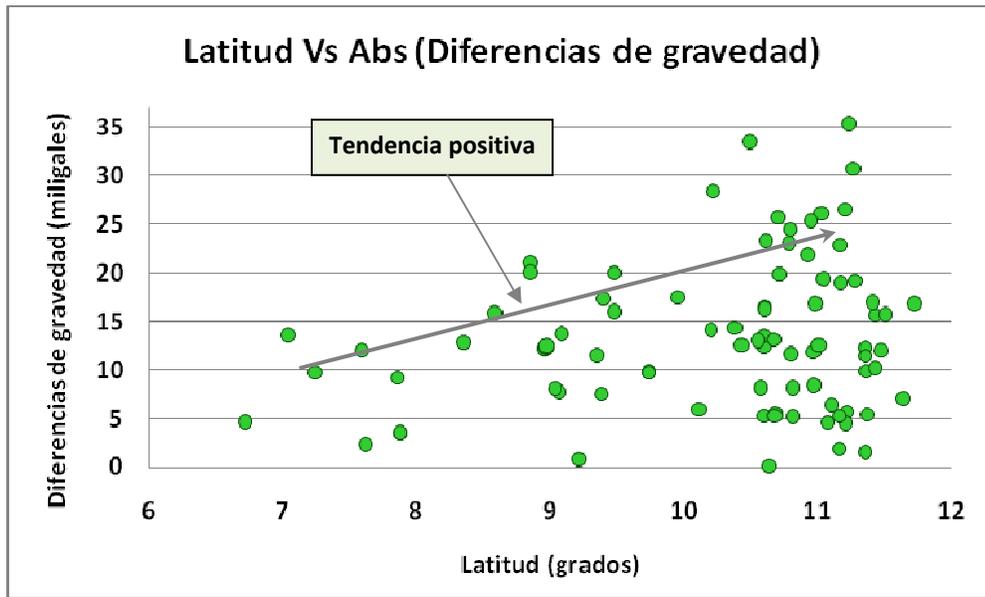


Figura 4.39. Gráficos de dispersión gravedad observada terrestre y satelital contra latitud. Se observa una tendencia positiva de crecimiento de las diferencias de gravedad con la latitud.

Comparando ahora las diferencias de gravedad (en valor absoluto) con la elevación de cada estación (Figura 4.40), se observa que no existe relación lineal aparente entre ellas, lo que implica que las diferencias de gravedad observada entre los datos satelitales y terrestres son independientes, en cierto modo, de las condiciones topográficas presentes.

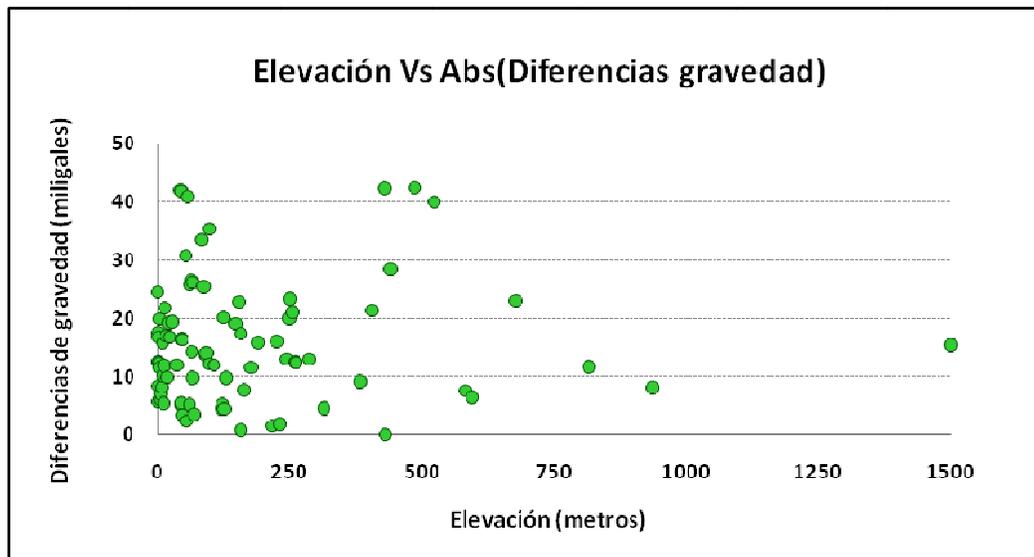


Figura 4.40. Gráfico de dispersión elevación contra diferencias de gravedad (en valor absoluto), en el cual no es posible observar tendencia conjunta.

Para corroborar este comportamiento, se presenta el mapa topográfico de Venezuela y sobre este, los cuartiles correspondientes a los valores absolutos de las diferencias (Figura 4.41). En general, es difícil reconocer alguna tendencia a priori, puesto que los cuartiles se encuentran distribuidos por todas las regiones del mapa y solamente se registra una aglomeración de las mayores diferencias hacia la zona noroccidental del país. A pesar de esto, no es posible afirmar con certeza que la topografía esté incidiendo efectivamente en las diferencias de gravedad observadas.

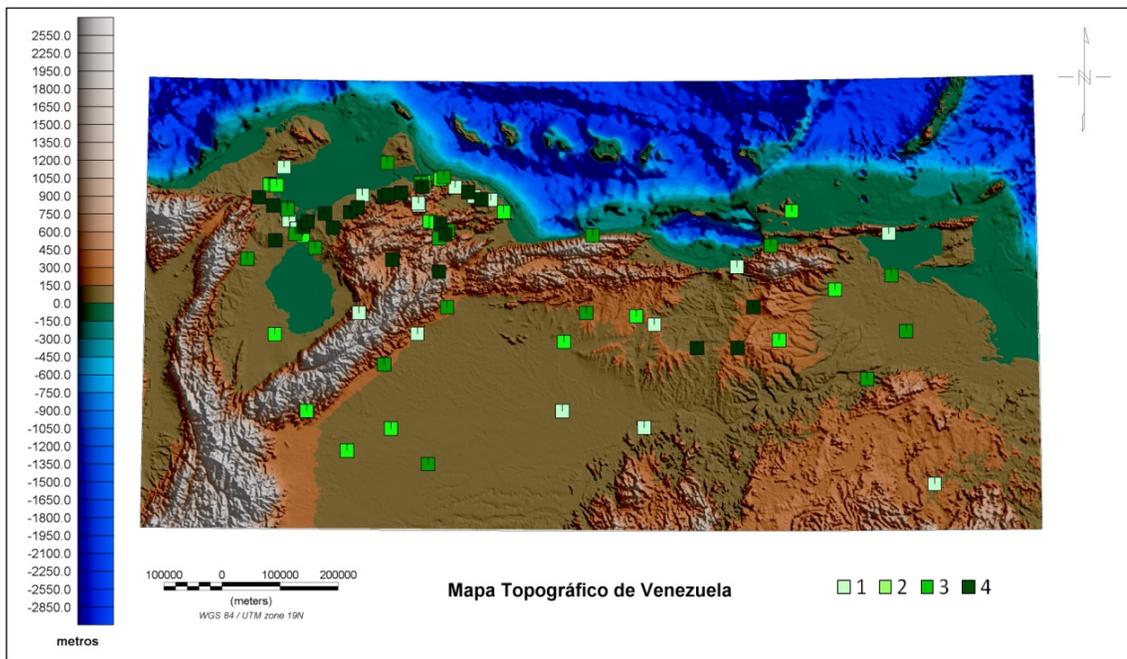


Figura 4.41. Percentiles de diferencias de gravedad sobre el mapa topográfico de Venezuela. Los percentiles se encuentran distribuidos de forma aleatoria. Sólo se observa una aglomeración de las mayores diferencias en la región noroccidental del país (cuadros verde oscuro).

De forma general, se ha observado que los datos satelitales y terrestres presentan considerables similitudes en términos estadísticos y espaciales. Los descriptivos básicos y gráficos mostrados indican que ambos datos tienen distribuciones similares, están altamente correlacionados y tienen una tendencia de variabilidad con la latitud. Las diferencias por otro lado, parecen ser ocasionadas por factores distintos a la topografía o ubicación espacial. Hay una componente de origen desconocido hasta ahora que ocasiona las diferencias de gravedad promedio de 11 miligales entre los datos terrestres y satelitales.

4.3.3 Geoestadística: Kriging

El objetivo principal era comparar los conjuntos de datos en función de elementos geoestadísticos como la Variografía.

4.3.3.1 Variografía comparativa

Se generaron los variogramas para gravedad observada satelital y terrestre con el fin de examinar direcciones principales de máxima y mínima continuidad (Figura 4.42). La distancia máxima o *cutoff* empleada fue de 2 grados y el ancho de la ventana de búsqueda igual a 0.12 grados. Ambos mapas muestran que las tendencias de mayor y mínima continuidad se encuentran a 265° y 175° medidos a partir del norte.

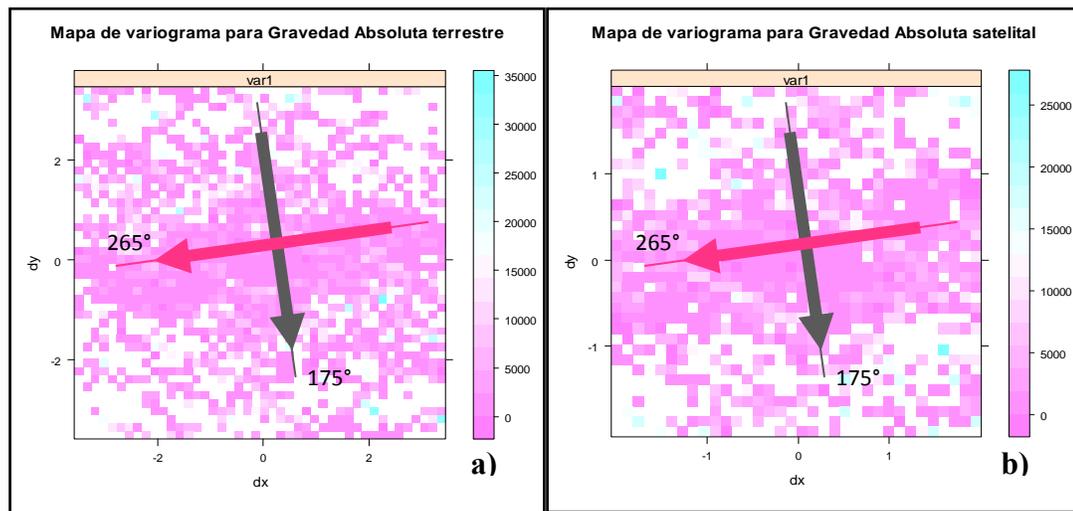


Figura 4.42. a) Mapa de variograma para gravedad observada terrestre. b) Mapa de variograma para gravedad observada satelital. Nótese la similitud en términos de variabilidad direccional.

Seguidamente, se presentan los variogramas experimentales elaborados tomando en cuenta las tendencias observadas (Figura 4.43), por ello las direcciones de búsqueda fueron 265° y 175° . El ancho de la ventana de búsqueda y la distancia máxima de alcance se conservaron en 0.12 y 2 grados, respectivamente.

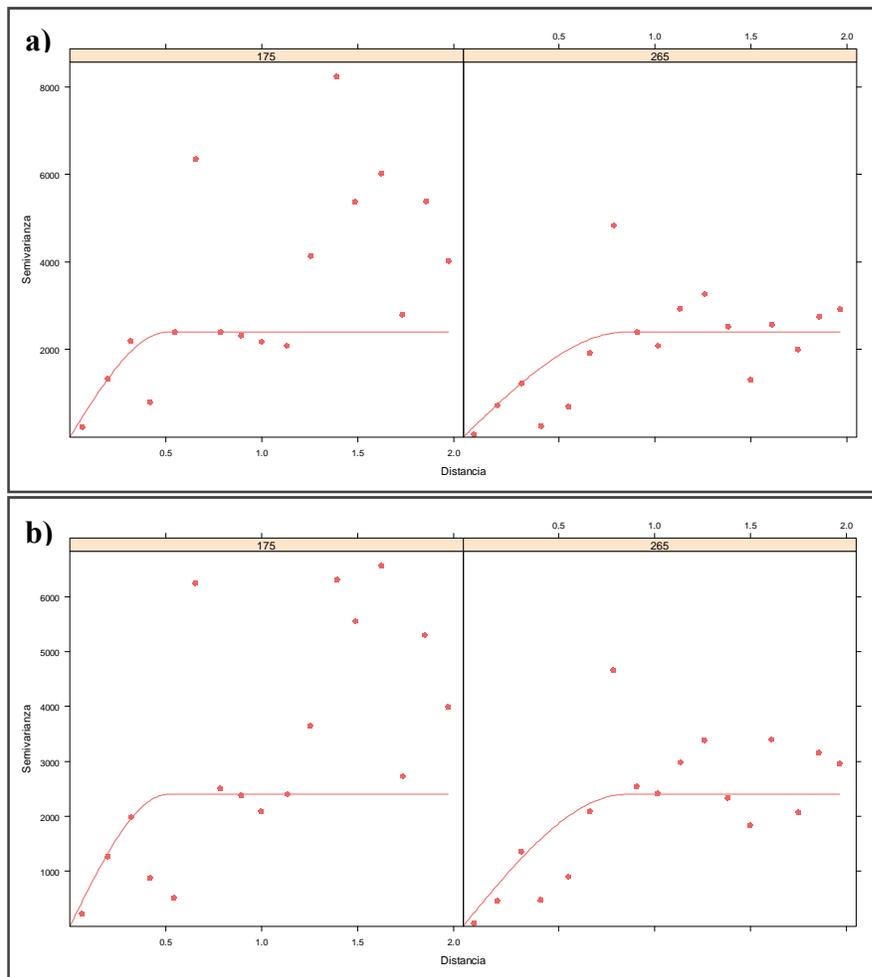


Figura 4.43. Variogramas teóricos ajustados sobre variogramas experimentales en la dirección de máxima y mínima continuidad de gravedad observada terrestre (a) y satelital (b).

Se ajustó entonces el variograma teórico al variograma experimental terrestre, a partir de un modelo esférico, cuyos parámetros de ajuste fueron: $sill = 2400$, $nugget = 0$, $rango = 0.85$ y relación $RangoMenor/RangoMayor$ igual a 0.6 (elipse de anisotropía). Luego, los mismos parámetros fueron empleados para ajustar el modelo teórico al variograma experimental satelital. Los resultados muestran un óptimo ajuste en ambos gráficos, lo cual permite sugerir que la correlación espacial entre los datos satelitales y terrestres es análoga, partiendo de las direcciones de anisotropía ya planteadas y la variabilidad con la distancia evaluada en los variogramas experimentales.

De igual forma, dado que los datos terrestres no presentaban una buena distribución espacial, se generó la variografía de los datos de satélite originales (no muestreados) con la finalidad de determinar las direcciones de máxima y mínima continuidad, así como los parámetros generales del variograma a partir de un conjunto de datos de alta resolución y de distribución regular.

El mapa de variograma de los datos satelitales originales es mostrado en la Figura 4.44. El ancho de la ventana de búsqueda es de 0.12 grados y la distancia máxima o *cutoff* igual a 3 grados. Las direcciones preferenciales corresponden a 45° para la máxima continuidad espacial y 135° para la mayor anisotropía.

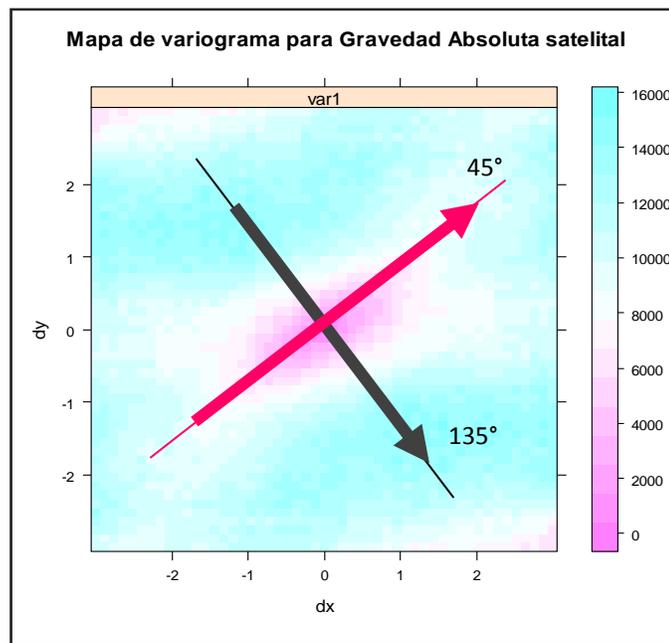


Figura 4.44. Mapa de variograma para gravedad observada satelital con direcciones de máxima y mínima continuidad.

Luego, se elaboró el variograma experimental (Figura 4.45) y su variograma teórico ajustado por un modelo esférico, con *sill* = 9800, *nugget* = 0, rango = 1.87 y relación RangoMenor a RangoMayor igual a 0.65.

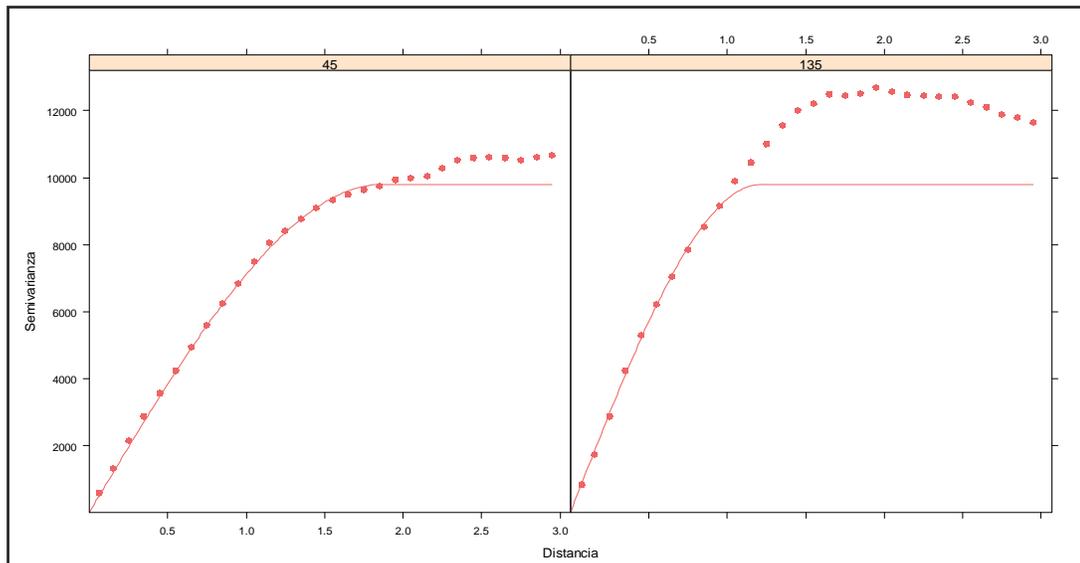


Figura 4.45. Variograma teóricos ajustados sobre variograma experimentales para gravedad satelital.

La distribución espacial inherente a los datos de gravedad observada terrestre conlleva a cierta pérdida de información a poca distancia, lo cual no garantiza la robustez de los resultados del Kriging. Las comparaciones entre los valores de gravedad del modelo combinado y los datos terrestres, no fueron posibles en términos de mapas y respuestas geológicas asociadas, dado que la red de primer orden tiene intrínsecamente muy poca cobertura, y su utilidad es sólo para apoyar la creación de redes de órdenes inferiores, a partir de las cuales sí es posible generar mapas de mayor resolución.

En general, se observó la consistencia del dato proveniente del modelo combinado desde el punto de vista estadístico y espacial con los rangos de los valores medidos en las estaciones de referencia terrestres.

CAPÍTULO V

SÍNTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

Los datos de AB satelital y terrestre presentan distribuciones similares y se ajustan a los estándares de normalidad necesarios. El coeficiente de correlación entre las variables es de 0.93 y presentan una relación lineal creciente.

Las diferencias de AB tienen una componente sistemática de variación con la latitud, relacionadas con el efecto de arrastre del satélite durante el recorrido norte-sur por la órbita correspondiente y la variación de las cotas en esta dirección.

Para la Faja Petrolífera tres factores son responsables en gran medida de las diferencias de AB encontradas:

- Diferencias de cota: en particular en aquellas zonas con cotas mayores a 20 metros.
- Distribución espacial de los datos: las estimaciones del Kriging presentan varianzas altas en ausencia de datos.
- Adquisición de los datos: en algunas áreas con diferencias de cota menores a 20 metros existen datos fuera de los rangos de incertidumbre permitidos. Aparentemente, las diferencias de anomalía encontradas no están relacionadas con la estimación topográfica, por lo que se cree que la fuente de error puede estar vinculada con el equipo empleado para levantar los datos.

El análisis geoestadístico apunta que al establecer intervalos de confianza del 95% alrededor de los datos terrestres, los datos del modelo combinado con datos satelitales se encuentran dentro de estos límites en un 90% de los casos. Y este 10% de datos fuera de rango puede ser explicado a partir de diferencias de cota mayores a 20 metros, el instrumental empleado durante la adquisición, problemas de borde y de estimación del predictor debido a la ausencia de datos en ciertas zonas.

5.2. CORDILLERA DE LA COSTA.

Los datos de anomalía de Bouguer satelitales y terrestres muestran una reiterada semejanza en las distribuciones de los histogramas correspondientes y un buen ajuste de los datos a las rectas teóricas de normalidad.

Al igual que para el apartado anterior, hay una evidente dependencia lineal entre AB satelital y AB terrestre traducida en una tendencia positiva y una alta correlación entre las variables.

Los datos guardan una relación sistemática con la longitud y la latitud, que aumenta con la latitud en dirección S-N y con la longitud de este a oeste (E-O). Esta tendencia conjunta NO-SE tiene su origen en dos aspectos: la geología característica de la Cordillera de la Costa, donde los cuerpos tienen contrastes laterales y tienden a alienarse en dirección E-O, y en la variación gradual del geoide en dirección NO-SE. De forma equivalente, las cotas terrestres y satelitales también varían con la longitud.

La distribución normal con media centrada en cero sugiere que las diferencias de AB son de origen aleatorio. Las diferencias de cota, por el contrario indican que en promedio son cercanas a 50 metros. Asimismo, no se observa ninguna tendencia conjunta entre diferencias de AB y diferencias de cotas, ni dependencia con la ubicación espacial (longitud o latitud).

En resumen, según los resultados numéricos y geoestadísticos:

- El origen de las diferencias entre AB satelital y terrestre es de origen aleatorio. El origen de estas diferencias puede estar relacionada con el instrumental gravimétrico y topográfico empleado durante las distintas adquisiciones.
- No es posible determinar las causas que generan las diferencias de cota. La hipótesis planteada es que la estimación de las cotas por parte de alguna de las fuentes no es confiable, en particular porque los datos terrestres presentan el efecto mixto de cinco fuentes diferentes.

- Los datos satelitales son equivalentes a los terrestres en el 98% de los casos.

5.3. RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL.

Se observa afinidad entre los datos satelitales y terrestres desde el punto de vista numérico y estadístico; se encuentran ampliamente relacionadas a partir de una tendencia positiva incuestionable, cuyo coeficiente de correlación es 0.98. Además, ambos conjuntos de datos muestran una tendencia consecuente de incremento de la gravedad con la latitud.

Las diferencias de gravedad son en promedio de 11 miligales, siendo el máximo y mínimo de -13.5 y 35 miligales respectivamente. No presentan una tendencia espacial clara; sin embargo, parecieran tener un aumento de sus valores con la latitud. Al compararlas con los datos de elevación, se observa general independencia de las condiciones topográficas presentes. Estadísticamente no fue posible determinar con claridad la componente que genera estas diferencias.

Las observaciones más importantes derivadas del análisis geoestadístico son:

- Los variogramas experimentales muestran las mismas direcciones de anisotropía y variabilidad con la distancia, lo cual implica que la correlación espacial entre los datos satelitales y terrestres es buena.
- Los valores de gravedad observada terrestre tienen fuertes restricciones relacionadas con la ubicación espacial.

5.4 DATOS SATELITALES VS DATOS TERRESTRES

A partir de todo el estudio estadístico previo se demostró que los datos generados por modelos combinados que incorporan medidas satelitales tienen ventajas sobre los datos adquiridos tradicionalmente en tierra, en lo relacionado con la homogénea distribución de los datos medidos.

La distribución espacial inherente a los datos utilizados para realizar los mapas, es importante para obtener resultados de calidad que permitan establecer interpretaciones sólidas y precisas del comportamiento gravimétrico en profundidad de las estructuras presentes en determinada zona de estudio. Es importante generar mapas con datos distribuidos de la forma más regular posible, característica principal de los datos de origen satelital, la cual no siempre es posible encontrar en datos adquiridos en tierra.

Es primordial además, el aprovechamiento de las tecnologías espaciales para los estudios de gravedad terrestre. Los beneficios inherentes a estas adquisiciones satelitales son innegables y se han puesto de manifiesto en esta investigación: datos de calidad, libres de costo y con disponibilidad casi inmediata a la comunidad científica.

Se sabe además, que uno de los aspectos más novedosos en la medición satelital es la captura de mediciones sostenida o revisita, lo cual permite una precisión garantizada en el tiempo, así como la posibilidad de obtener datos de variación temporal del campo de gravedad de nuestro planeta. De esta manera se facilita insistentemente la elaboración de mapas de alta precisión y una mejora sustancial de los conocimientos en estudios geodésicos, para la caracterización del geoide terrestre y cálculo de alturas ortométricas con una precisión superior.

Finalmente, luego de todo el análisis y la concluyente correspondencia numérica y espacial, los datos satelitales pueden ser validados como equivalentes a los datos terrestres.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base en los resultados obtenidos y descritos anteriormente se derivan las siguientes conclusiones:

1. Las semejanzas encontradas entre los datos generados por modelos combinados con datos satelitales y terrestres desde el punto de vista estadístico y espacial permitieron validar los datos de satélite como equivalentes a los terrestres, al encontrarse entre los límites de incertidumbre permitidos en más de un 90% de los casos.
2. Del análisis estadístico detallado se obtuvo que los datos satelitales y terrestres presentan una dependencia lineal positiva traducida en una tendencia constante de aumento de la gravedad con la latitud y un alto coeficiente de correlación.
3. En términos geoestadísticos, para Faja Petrolífera, los mapas de variogramas indican que las tendencias de mayor continuidad se encuentran a 330° y la de menor continuidad a 240° . El variograma teórico era un modelo esférico con: *sill* = 160, *nugget* = 0, rango = 0.75 y relación RangoMenor/RangoMayor igual a 0.7 (elipse de anisotropía). Por otro lado, en Cordillera de la costa, la dirección de máxima continuidad está a 245° y la mínima a 155° . Este variograma se ajustó a partir de un modelo gaussiano, con *sill* = 200, *nugget* = 20, rango = 0.12 y relación RangoMenor/RangoMayor igual a 0.6.
4. En Cordillera de la Costa, las diferencias promedio de AB son del orden de los 7.30 miligales, mientras que las diferencias de cota alcanzan una media de 56.85 metros. Para Faja Petrolífera, las diferencias de AB y cotas son de 4.66 y 17.52 en promedio, respectivamente.

5. En la Faja Petrolífera las diferencias de cota mayores a 20 metros, la distribución espacial de los datos y el procesamiento para calcular la AB terrestre son las fuentes de error responsables de las diferencias de AB encontradas. En Cordillera de la Costa, las diferencias entre AB satelital y terrestre son de origen aleatorio.
6. El mapa de AB terrestre elaborado a partir de Kriging en la Faja, muestra un efecto regional importante con amplios gradientes hacia la región central del mapa y en dirección E-O. Contrariamente, el comportamiento de las isoanómalas en el mapa AB terrestre muestra que la dirección preferencial es NO-SE. Sin embargo, se comprobó que el mapa satelital tiene mejor respuesta gravimétrica al observar la correspondencia con el mapa de profundidad al tope de basamento de la zona.
7. En la Cordillera de la Costa, los mapas de anomalía de Bouguer terrestre y satelital muestran conjuntamente una tendencia regional relevante en sentido SO-NE, lo cual guarda relación con la presencia de cuerpos geológicos de la Cordillera de la Costa. Las diferencias más evidentes entre el mapa de AB satelital y el terrestre tienen relación con la resolución y ubicación de los datos empleados, lo cual se evidencia en las suaves tendencias presentes en el mapa de anomalía de Bouguer terrestre y en las grandes irregularidades del mapa satelital, asociadas con la distribución de densidades en profundidad, dada la gran variedad litológica encontrada.
8. En el análisis correspondiente a la RGN, la gravedad observada satelital y terrestre se encuentran ampliamente relacionadas a partir de una clara tendencia positiva, con un alto coeficiente de correlación. De igual forma, muestran un componente sistemático que implica un incremento de la gravedad con la latitud. Las diferencias de gravedad son en promedio de 11 miligales y no presentan evidencian tendencia espacial alguna, por lo que estadísticamente no fue posible determinar con claridad la componente que genera estas diferencias.

9. Geoestadísticamente hablando, los resultados sugieren una óptima correlación espacial entre los datos satelitales y terrestres, partiendo de las direcciones de anisotropía ya planteadas y la variabilidad con la distancia evaluada en los variogramas experimentales.

Finalmente, se recomienda generar nuevas metodologías estadísticas que permitan establecer una fuente de control de calidad para los datos satelitales adquiridos en zonas potencialmente complejas; para lo cual es indispensable unificar y compilar todas las bases de datos gravimétricos terrestres del país, con toda la información correspondiente al levantamiento y métodos de procesamiento empleados.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- AMBROSIO, R. (2002). **Modelaje gravimétrico del basamento de los conos aluviales de La Guaira, Macuto y Caraballeda, Edo. Vargas**. Boletín Geos, N° 35.
- AMBROSIO, R. (2007). **Geoestadística: Una herramienta para la interpretación de datos geocientíficos**. IX Congreso Geológico Venezolano. Caracas.
- BARLIER, F y LEFEBVRE M. (2001) **A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences**. The Century of Space Science, 1623-1651. Kluwer Academic Publishers.
- CAMPBELL, J (2007). **Introduction to remote sensing**. 4th ed. The Guilford Press.
- DALGAARD, P. (2002) **Introductory statistics with R**. Springer– Verlag Press.
- DUBRULE, O. (2003) **Geostatistics for seismic data integration in earth models**. Distinguished Instructor Short Course. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientist & Engineers.
- GARCÍA A. (2009). **Mapas de Anomalía de Bouguer y Anomalía Magnética de Venezuela elaborados a partir de datos satelitales**. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.
- GEOSOFT Inc. (2010). **Oasis montaj v.7.2.1 (HJ), Standard Edition**. [Programa].
- GRATEROL V. (1994). **Mapa de Anomalía de Bouguer de la República de Venezuela**. Memorias VII Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas, 162-169.
- GUJARATI, M. (2004). **Basic Econometrics**. 4th ed., McGraw-Hill, New York.

- HACKLEY, P. C., F. URBANI, A. W. KARLSEN, C. P. GARRITY (2006). **Mapa geológico de Venezuela a escala 1.750.000**. U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1109. Recuperado en Marzo 6, 2007, de: <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1109/>
- JARVIS A., REUTER H., NELSON A., GUEVARA E. (2008). **Hole-filled seamless SRTM data V4**. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- MA, D. (2006). **Regional positioning system using low earth orbit constellations**. Acta Astronautica, Volume 58, Issue 8, Pages 387-394.
- MCADOO, D. (2006) **Marine Geoid, Gravity, and Bathymetry: An increasingly clear view with satellite altimetry, 15 years of progress in radar altimetry**. Symposium, Venice, Italy.
- ORIHUELA, N. (1990). **Investigación gravimétrica de la Cordillera de la Costa. Sector Nor-Central**. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Inédito.
- PAVLIS, N., HOLMES, S., KENYON, S. y FACTOR, J. (2008). **Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008**. 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18.
- PEBESMA, E., (2004). **Multivariable geostatistics in S: the gstat package**. Computers & Geosciences, Volume 30, Pages: 683-691.
- PEBESMA, E. y BIVAND R., (2005). **Classes and methods for spatial data in R**. R News, Volume 5, N°2, Pages: 9-13.

- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RODRÍGUEZ, I. y GRATEROL V. (1975). **Investigación gravimétrica en la región noroccidental de Venezuela**. Boletín del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Volumen XII, N° 23.
- RODRÍGUEZ, I. (1977). **Proyecto “Investigación de la Faja Petrolífera del Orinoco por métodos geofísicos no convencionales”**. Fase I. Instituto Tecnológico – Foninves.
- ROSS, S. (2004) **Introduction to probability and statistics for engineers and scientists**. Third Edition. Elsevier Academic Press.
- RUIZ, F. (1989). **Modelaje gravimétrico de un perfil comprendido entre los poblados de Altagracia de Orituco, Edo. Guárico y Caraballeda, Dto. Federal**. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.
- SMITH, W. y WESSEL, P. (1990). **Gridding with continuous curvature splines in tension**. Geophysics, 55, 293-305.
- WAMPOLE, R (1999). **Probabilidad y estadística para ingenieros**. 6ª, ed. Prentice Hall Hispanoamericana.

APÉNDICES

A.1 PROGRAMA DE MUESTREO EN LENGUAJE R PARA LLEVAR LOS DATOS DE GRAVEDAD A RESOLUCIÓN ÚNICA.

```
dat.s <- read.table("DataSat.txt", header=T, sep="\t", dec=".")
dat.t <- read.table("DataTer.txt", header=T, sep="\t", dec=".")
coord.s <- dat.s[,-(3:4)]
coordx.t <- dat.t[,1]
coordy.t <- dat.t[,2]
len.s <- nrow(dat.s)
len.t <- nrow(dat.t)
win.dist <- 0.034/2

conteo.pos <- c()
output <- matrix(0,len.s,4)

for (i in 1:len.s)
{
  curr.s <- coord.s[i,]
  winx.min <- as.double(curr.s[1]-win.dist)
  winx.max <- as.double(curr.s[1]+win.dist)
  winy.min <- as.double(curr.s[2]-win.dist)
  winy.max <- as.double(curr.s[2]+win.dist)
  win.condition.x <- (winx.min < coordx.t)&(winx.max > coordx.t)
  win.condition.y <- (winy.min < coordy.t)&(winy.max > coordy.t)
  win.condition <- win.condition.x*win.condition.y
  conteo.pos <- c(conteo.pos,sum(win.condition))
  win.selec <- (1:len.t)*(win.condition)
  win.selec <- win.selec[win.selec>0]
  data.selec <- dat.t[win.selec,]
  if (nrow(data.selec)>0)
  {
    sdab=sd(data.selec[,4])
    sdcot=sd(data.selec[,3])
    estim.data <- rbind(dat.s[i,], data.selec)
    estim.dist <- as.matrix(dist(estim.data[,-3]))[-1,1]
    estim.weights <- (1/estim.dist)/sum(1/estim.dist)
    estim.value <- estim.weights%*%data.selec[,3]
    estim.value2 <- estim.weights%*%data.selec[,4]
    output[i,3] <- sdcot
    output[i,4] <- sdab
    output[i,1] <- estim.value
  }
}
```

```

        output[i,2] <- estim.value2
    }
    else
    {
        output[i,1:4] <- NA
    }
}

dat.s.final <- cbind(dat.s, output)
dat.s.ftrim <- dat.s.final[!is.na(output),]

write.table(dat.s.ftrim, "DataEstimada.txt", sep="\t", dec=".")

```

A.2. PROGRAMA DE MUESTREO EN LENGUAJE MATLAB PARA ASIGNAR VALORES DE GRAVEDAD EN UNA LOCALIZACIÓN DETERMINADA EMPLEANDO EL INVERSO DE LA DISTANCIA AL CUADRADO. LENGUAJE MATLAB.

```

%carga de datos
data.s=load ('sat.txt','Long','Lat','Grav');
dat.s = data.s (:,1:2);
data.t= load ('ter.txt', 'Long','Lat','Grav');
dat.t = data.t (:,1:2);
dist=zeros(length(dat.s),2);
datafinal=zeros(length(dat.t),4);

%ciclo for para calcular la distancia desde un punto i,j hasta cada par de
%coordenadas del vector de topografia

for i=1:size(dat.t(:,1))
    x1=dat.t(i,1);
    y1=dat.t(i,2);
    for j=1:size(dat.s(:,1))
        Aj=dat.s(j,1);
        Bj=dat.s(j,2);
        dist(j,1)=sqrt(((x1-Aj)^2)+((y1-Bj)^2));
        dist(j,2)= data.s(j,3);
    end

arreglo=sortrows(dist,1);
selec = arreglo(1:4,:); %primeras 4 líneas y todas las columnas...

```

```

selec(:,1)=selec(:,1)+0.000001;

%Calcular el valor de cota ponderado por el inverso de la distancia
inv(1,1)= (1/selec(1,1));
inv(2,1)= (1/selec(2,1));
inv(3,1)= (1/selec(3,1));
inv(4,1)= (1/selec(4,1));

suma=sum(inv);

peso(1,1)= inv(1,1)/suma;
peso(2,1)= inv(2,1)/suma;
peso(3,1)= inv(3,1)/suma;
peso(4,1)= inv(4,1)/suma;

estim.value(1,1)=peso(1,1)*selec(1,2);
estim.value(2,1)=peso(2,1)*selec(2,2);
estim.value(3,1)=peso(3,1)*selec(3,2);
estim.value(4,1)=peso(4,1)*selec(4,2);

gravtotal=sum(estim.value);

datafinal(i,1:2)=dat.t(i,1:2); %coordenadas tierra
datafinal(i,3)=data.t(i,3); % gravter
datafinal(i,4)=gravtotal; %gravSat

end

xlswrite('salida.xls', datafinal);

```